



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

삼중 주파수 운전 용량 결합형
장치에서 플라즈마 광진단을 이용한
전력 의존 식각 공정 제어 연구

2014년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
정 상 민

삼중 주파수 운전 용량 결합형
장치에서 플라즈마 광진단을 이용한
전력 의존 식각 공정 제어 연구

지도교수 김 곤 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
정 상 민

정상민의 석사학위논문을 인준함

2014년 8월

| | |
|---------|------------------|
| 위 원 장 | <u>황 용 석 (인)</u> |
| 부 위 원 장 | <u>김 곤 호 (인)</u> |
| 위 원 | <u>성 덕 용 (인)</u> |

요약

지난 수십 년 동안 무어의 법칙으로 대변되는 반도체 산업 기술은 매년 선폭을 줄여가며 생산성을 극대화 하여 발전해 왔다. 하지만 최근 여러 가지 기술적 문제로 선폭 축소에 한계에 도달하면서 고효율 공정 장비 개발과 공정 관리 기술 개발을 통한 비용 절감 및 생산성 증대를 꾀하고 있다.

반도체 제조 공정에 있어서 플라즈마를 이용한 식각 공정이 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 고밀도 플라즈마를 위한 초고주파 전원과 고에너지 이온을 위한 저주파 전원을 사용한 이중 주파수 용량 결합형 플라즈마 식각 장치가 유전막 식각 공정에 있어 널리 사용되고 있는데 초고주파 전원의 정상파 효과에 의하여 플라즈마 밀도 산포가 나빠지는 현상이 보고되었고 이를 보완하기 위하여 초고주파와 저주파 전원 사이의 중간 주파수 전원을 추가적으로 장착한 삼중 주파수 용량 결합형 플라즈마 식각 장치가 개발되어 생산성을 극대화 하고 있다.

삼중 주파수 활용으로 장치 제어가 복잡화 되고 요구되는 공정 수준이 고집적 초미세화 되어감에 따라 공정 진단 기술을 통한 공정 관리로 생산 비용 절감과 생산성 향상을 시도하고 있는데 지금까지의 공정 진단 기술은 플라즈마를 이용하는 공정임에도 불구하고 플라즈마를 배제한 통계적 방법에 의한 공정 진단이 개발되어 와서 그 정확도와 물리적 해석에 있어서 한계점이 많았다. 본 연구에서는 플라즈마 특성 인자 활용을 통해 플라즈마 공정 진단 기술 개발로 그 정확도를 높이고 모니터링 인자와 제어 인자의 결정 과정을 물리적 해석에 기반하여 명확해 질수 있도록 하였다. 여기서 플라즈마 특성 인자는 OES로 얻은 빛의 세기를 분석하여 계산한 EEDF 모양인자를 이용한다. EEDF 모양인자는 플라즈마 내의 고에너지 전자군의 비율을 모니터링 하여 플라즈마의 상태를 반응 메커니즘 기반으로 진단할 수 있게 한다.

실험에 사용된 장치는 상부 전극에는 100MHz 초고주파 전원을 장착하고 하부 전극에는 중간 주파수인 13.56MHz와 저주파인 2MHz 전원을 장착한 삼중 주파수 용량 결합형 플라즈마 식각 장치로서 각 전력 인자에 의한 플라즈마 특성 해석을 하였다. 특히 13.56MHz 전원 인가 전력에 따른 식각 공정의 비선형적 특성을 관찰하였고 플라즈마 장치 회로 모델을 이용하여 해석하였다. 100MHz 초고주파 전원의 정상파 효과와 고전력 사용을 요구하는 2MHz 저주파 전원의 특성에 따른 한계 때문에 미세한 공정 결과의 제어를 위한 인자로는 13.56MHz 전원이 가장 적절한 상황이므로, 13.56MHz 전원과 플라즈마의 비선형성 해석은 정확한 공정 진단과 제어를 위하여 필수적이다.

플라즈마 공정 진단을 위한 인자 선정은 플라즈마 해석을 통하여 공정 영역을 정의 하고 이 영역에서 각 전력 인자의 변화에 민감도가 높은 OES 센서와 EEDF 모양인자를 이용하여 식각 공정 결과와의 상관관계를 분석으로 식각률 가상 예측 모델을 도출 하였고 이는 상관계수 93.8%의 높은 정확도를 보였다. 또한 전력 인자에 따른 식각 공정 결과의 상관관계 분석을 통하여 13.56MHz 전력 인자를 통항 식각 미세 제어가 가능하다는 것을 확인하였다.

따라서 이 연구는 향후 플라즈마 공정 장치 스스로 공정을 관리하고 제어할 수 있는 Smart Equipment 개발을 위한 개념을 만들어 나가는 데 있어 큰 의의를 가질 것이다.

주요어 : 플라즈마 식각 공정, 용량 결합형 플라즈마, 공정 진단, 가상 예측, 공정 제어

학번 : 2012-23286

목차

| | |
|--|-----|
| 요약..... | i |
| 목차..... | iii |
| 표목차..... | v |
| 그림목차..... | vi |
| 제1장. 서론..... | 1 |
| 1.1 반도체 식각 공정..... | 3 |
| 1.2 공정 진단과 가상 계측..... | 6 |
| 1.3 삼중 주파수 용량 결합형 플라즈마..... | 8 |
| 1.4 연구 동기..... | 10 |
| 1.5 연구 목표..... | 12 |
| 제2장. 실험 장치 구성..... | 13 |
| 2.1 Triple Frequency CCP 장치 구성..... | 13 |
| 2.2 장치 운전 조건..... | 16 |
| 2.3 식각 시료..... | 17 |
| 제3장. 전력인자에 의한 플라즈마 특성..... | 19 |
| 3.1 플라즈마 주파수와 장치 운전 주파수..... | 19 |
| 3.2 100MHz 초고주파 전원의 역할..... | 22 |
| 3.3 Narrow Gap CCP에서 100MHz 전원에 의한 운전 영역 변화..... | 27 |
| 3.4 13.56MHz 중간 주파수 전원의 역할..... | 31 |
| 3.5 2MHz 저주파 전원의 역할..... | 34 |
| 제4장. 공정 플라즈마 모니터링..... | 39 |
| 4.1 센서 민감도 랭킹 실험..... | 39 |
| 4.2 플라즈마 진단 인자 설정..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 4.3 EEDF 모양 인자..... | 46 |
| 4.4 주파수 전력 인자와 플라즈마 진단 인자와의 상관관계..... | 48 |
| 4.5 플라즈마 진단 인자와 식각 공정 결과와의 상관관계..... | 50 |
| 제5장. SiO ₂ 의 13.56MHz power에 의한 공정 제어... | 55 |
| 5.1 식각률 가상 계측 모델..... | 55 |
| 5.2 주파수 전력 인자와 식각 공정 결과와의 상관관계..... | 57 |
| 5.3 주파수 전력 인자를 이용한 공정 제어..... | 60 |
| 제6장. 결론..... | 63 |
| 참고문헌..... | 65 |
| 부록..... | 67 |
| Abstract..... | 77 |

표목차

| | |
|--|----|
| 표 2.1. Triple Frequency CCP 장치 spec..... | 15 |
| 표 2.2. 장치 운전 조건..... | 16 |
| 표 4.1. 선정된 56개의 OES 센서..... | 44 |
| 표 4.2. 선정된 24개의 FDC 센서..... | 45 |
| 표 A.1.1. 100MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹..... | 67 |
| 표 A.1.2. 100MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹..... | 68 |
| 표 A.2.1. 13.56MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹..... | 69 |
| 표 A.2.2. 13.56MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹..... | 70 |
| 표 A.3.1. 2MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹..... | 71 |
| 표 A.3.2. 2MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹..... | 72 |
| 표 B.1. 식각 공정 실험 결과 - 모니터링 인자와 식각률..... | 73 |

그림목차

| | |
|---|----|
| 그림 1.1. DRAM 반도체 개발 로드맵 [1]..... | 2 |
| 그림 1.2. 플라스마를 이용한 식각 - Reactive Ion Etch [2]..... | 4 |
| 그림 1.3. XeF ₂ 에 노출 시의 실리콘 식각속도, XeF ₂ 와 Ar ⁺ 이온빔에 동시 노출 시의 실리콘 식각속도, Ar ⁺ 이온빔에만 노출 시의 식각속도 [2]..... | 5 |
| 그림 1.4. 현재까지의 플라스마 공정 진단 기술 - 플라스마를 배제한 장치 신호들의 통계적 기법을 통해 이뤄지고 있음..... | 7 |
| 그림 1.5. Dual Frequency CCP와 Triple Frequency CCP..... | 9 |
| 그림 1.6. Triple Frequency CCP에서 각 전력인자의 10% 변동에 따른 Etch Rate의 변화율..... | 11 |
| 그림 1.7. 본 연구의 목표와 연구 진행 방향..... | 12 |
| 그림 2.1. Triple Frequency CCP 장치 개략도..... | 14 |
| 그림 2.2. DRAM 단면 구조..... | 17 |
| 그림 2.3. DRAM MC 시료 구조..... | 18 |
| 그림 3.1. 플라스마 주파수와 장치 운전 주파수..... | 21 |
| 그림 3.2. 주파수에 따른 Stochastic heating 효율..... | 22 |
| 그림 3.3. 운전 주파수와 ion flux와의 관계[5]..... | 24 |
| 그림 3.4. Ion Current Density와 Etch Rate과의 관계[6]..... | 24 |
| 그림 3.5. 주파수에 따른 플라스마 밀도 분포[7]..... | 25 |
| 그림 3.6. 100MHz Power에 따른 OES 750nm intensity 분포..... | 26 |
| 그림 3.7. Langmuir Probe로 전극 70mm 위치에서 측정한 100MHz Power에 따른 플라스마 밀도..... | 27 |
| 그림 3.8. OES Probe로 전극 0mm, 70mm, 140mm, 190mm에서 측정한 100MHz Power에 따른 750nm intensity..... | 28 |
| 그림 3.9. Triple Frequency CCP의 Circuit Model[8]..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 그림 3.10. 주파수에 따른 RF Voltage..... | 31 |
| 그림 3.11. 13.56MHz, 2MHz power에 따른 Bias Voltage..... | 32 |
| 그림 3.12. 13.56MHz, 2MHz power에 따른 Etch Rate..... | 33 |
| 그림 3.13. 13.56MHz power에 따른 OES 750nm intensity..... | 35 |
| 그림 3.14. 2MHz power에 따른 OES 750nm intensity..... | 36 |
| 그림 4.1. 센서 민감도 랭킹 실험 조건..... | 40 |
| 그림 4.1. 장치 운전 중 OES로 얻은 Full Spectrum..... | 42 |
| 그림 4.2. Step Function 형태로 반응하는 FDC 센서의 예 - 100MHz power와 Matcher의 cap position..... | 42 |
| 그림 4.3. Step Function 형태로 반응하지 않고 연속적인 변화 곡선을 보이는 FDC 센서의 예 - Bottom Temperature와 Chiller | 43 |
| 그림 4.4. 저전력, 저밀도 기준 조건에 민감하게 반응한 OES 센서와 식각률의 상관관계 $R^2=93.8\%$ | 51 |
| 그림 4.5. 고전력, 고밀도 기준 조건에 민감하게 반응한 OES 센서와 식각률의 상관관계 $R^2=79.3\%$ | 52 |
| 그림 4.6. FDC 센서와 식각률의 상관관계 $R^2=51.0\%$ | 53 |
| 그림 5.1. 식각률 가상 계측 모델에 의한 예측 식각률과 실측 식각률 | 56 |
| 그림 5.2. 기준점에서 벗어난 공정 결과를 전력 인자를 이용한 미세 제어를 통해 기준점에 만족하는 공정 결과를 얻을 수 있음 | 61 |

제1장. 서론

매년 메모리 반도체 선폭을 줄여가며 생산성을 극대화 해온 메모리 반도체 산업이 여러 기술적인 문제로 선폭 축소 한계에 도달하게 되었다.[1] 그림1.1은 DRAM 반도체 개발 로드맵이다. 2008년 55nm급 DRAM에서 2012년 25nm급 DRAM이 개발 되었으나 그 이후의 20nm 이하의 공정을 개발하는데 Cell Capacitor 문제, Sensing Margin 문제, Retention Time 문제, Parasitic Resistance 문제, Gate Oxide 동작 문제 등 여러 가지 소자의 동작 신뢰성에 대한 기술적인 문제로 10nm 급 DRAM 개발에 어려움을 겪고 있다는 것을 보여준다. 이러한 문제점은 반도체 소자의 미세화에 따른 소자의 특성이 매우 민감하여 아주 작은 문제에도 소자 동작이 되지 않을 정도로 불안정해졌음을 보여준다. 즉 제조 공정 중에 발생할 수 있는 작은 문제점에 의해서도 소자의 불량으로 직결될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 공정 진행 중 모니터링을 통한 공정 이상 여부 확인과 이상이 감지되었을 때 공정 제어를 통해 정상적으로 공정이 진행되도록 제어하는 기술이 중요하게 대두되었으며 이는 공정 진단, 공정 제어 같은 공정 관리 기술 개발을 통해 시도되고 있다.

본 연구에서는 반도체 제조 공정 중 약 30% 비중을 차지하고 있는 플라즈마를 이용한 공정 중에서 플라즈마 식각 공정의 공정 관리를 위한 플라즈마 공정 진단과 제어 방법을 제안하고자 한다.

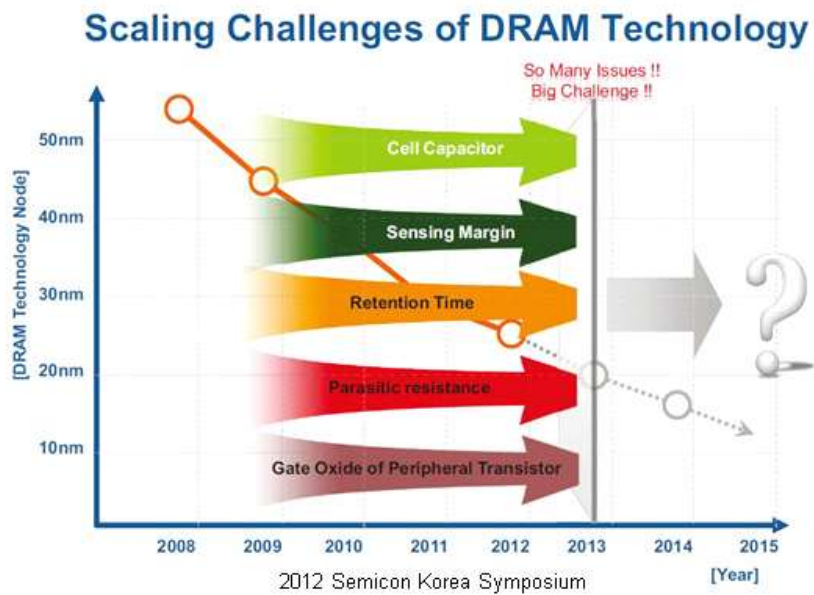


그림 1.1. DRAM 반도체 개발 로드맵 [1]

1.1 반도체 식각 공정

반도체 제조공정은 크게 증착(Film Deposition), 노광(Lithography), 식각(Etching) 공정의 연속으로 이루어져 있다. 여기서 본 연구의 주제인 식각 공정은 습식식각(Wet Etching)과 건식식각(Dry Etching)으로 나눌 수 있다.

우선 습식식각은 반응성 용액을 사용하여 물질을 선택적으로 제거할 때 사용하는 방법으로 고전적으로 많이 사용되어온 방법이다. 이와 같은 습식식각을 사용 시에는 대체로 등방성 식각(Isotropic Etching) 즉, 수직방향으로의 식각속도와 수평방향의 식각속도가 같은 식각이 얻어지게 된다. 반면 건식식각은 반응성 기체 혹은 증기나 이의 이온이나 분해된 가스를 이용하여 물질을 선택적으로 제거하는 방법이다. 반응성 기체나 증기를 이용하는 경우는 습식식각의 경우와 마찬가지로 등방성 식각이 얻어지지만 플라즈마를 이용하여 분해된 가스나 이온을 이용하여 식각하는 경우 대체로 이방성 식각(Anisotropic Etching)의 형태가 얻어진다.

플라즈마를 이용한 식각의 특징은 그림 1.2에서 보여주듯 반응성 기체에 의한 화학적 식각과 이온에 의한 물리적 식각이 동시에 일어난다는 점이다. 그리고 이 두 식각이 함께 일어나면서 각각의 식각이 따로 일어날 때 보다 큰 효과를 보이게 된다. 예를 들어 그림 1.3에 보이는 바와 같이 실리콘을 XeF_2 gas에 노출시키면 실리콘의 화학적 식각이 진행된다. 그리고 실리콘을 Ar^+ 이온에 노출시키면 물리적 충격에 의해 물리적 식각이 일어난다. 이때 Ar^+ 이온과 XeF_2 gas를 동시에 주입하게 되면 식각속도가 크게 증가하게 되는데 그 시너지 효과가 매우 크다. 이는 단순 단일 단계 반응이 아닌 식각 공정의 특성상 화학적 식각에 연계된 여러 단계의 반응들이 이온 충돌 에너지 전달에 의한 물리적 식각에 의해 각각의 반응율이 높아져 연쇄적으로 반응율이 상승되기 때문이다. 따라서 화학적 식각과 물리적 식각의 시너지 효과를 통한 공정 효율 극대화를 위해 최신 식각 공정은 플라즈마를 매질로 하여 진행이 되고 있고 본 연구에서 제안하고자 하는 공정 진단 방법 역시 플라즈마 공정 진단이다.

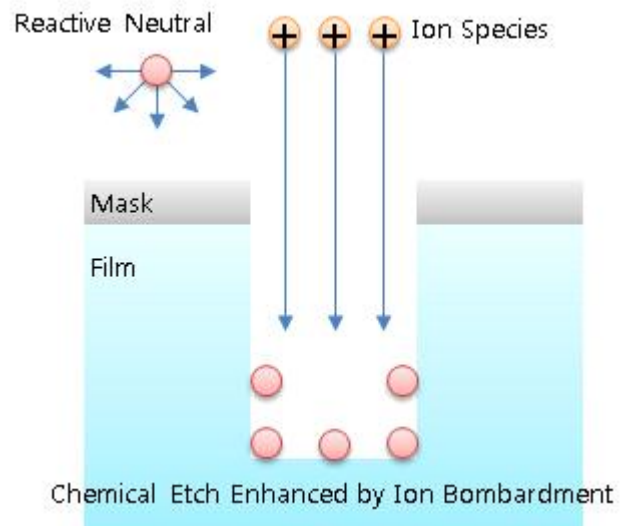


그림 1.2. 플라즈마를 이용한 식각 - Reactive Ion Etch [2]

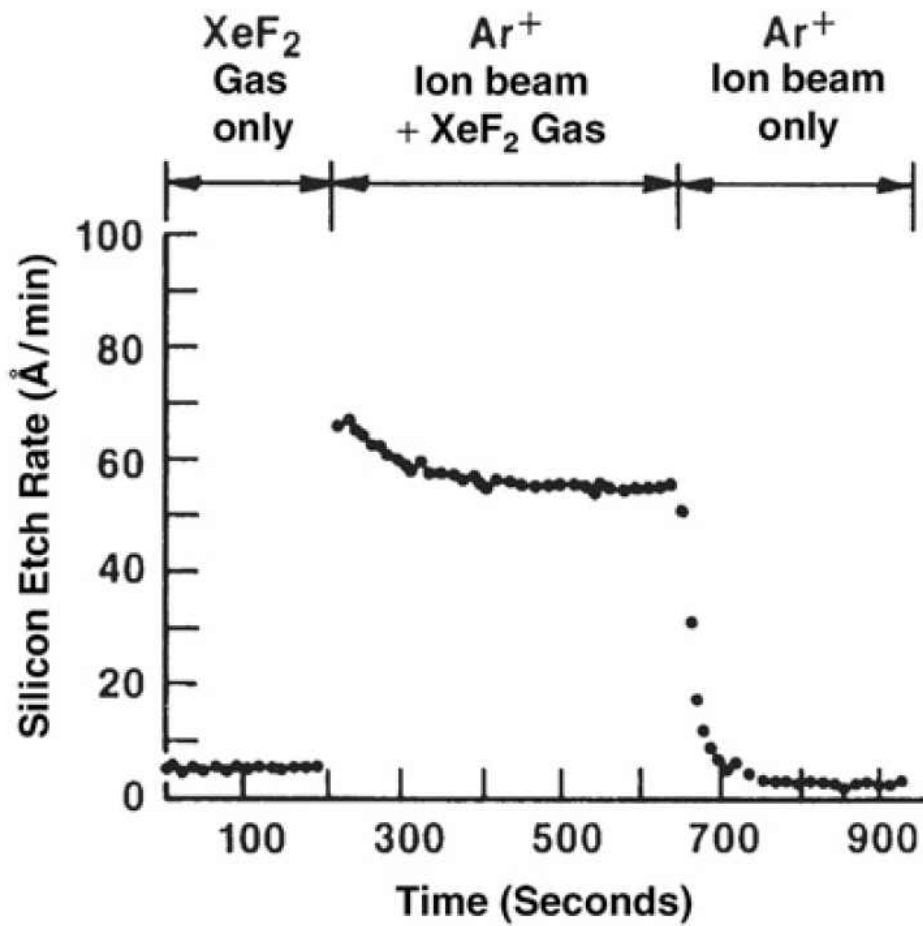


그림 1.3. XeF₂에 노출 시의 실리콘 식각속도,
XeF₂와 Ar⁺ 이온빔에 동시 노출 시의 실리콘 식각속도,
Ar⁺ 이온빔에만 노출 시의 식각속도 [2]

1.2 공정 진단과 가상 계측

반도체 기술은 1950년대에 집적 회로가 발명된 이후 오늘날까지 급속한 발전을 거듭하고 있다. 반도체는 끊임없이 고집적화, 고성능화, 소형화, 경량화 되고 있으며, 현대의 거의 모든 장치에 내장되어 있다. 이러한 추세에 따라 반도체 공정은 더욱 높은 정밀도를 요구하고 있으며, 완전한 반도체를 생산하기 위하여 공정 중에 아주 작은 오류조차 허용되지 않는다.

하나의 완전한 반도체를 제조하기 위해서는 매우 다양하고 긴 과정을 거쳐야 한다. 반도체를 제조하는 세부 공정들 중에는 자동화로 인하여 작업자의 중간 관여 없이 연속적으로 수행되는 공정들이 많다. 만약 이러한 공정들 중에 이상이 발생했다면 그러한 연속된 공정들이 모두 종료되어야만 그 이상을 발견할 수 있다.

이러한 문제를 극복하기 위하여 공정이 종료되기 전에 미리 이상을 발견하기 위한 공정 진단 방법인 고급 공정 제어(Advanced Process Control, APC) 분야가 최근에 많은 관심을 끌고 있다. 특히, 이상 탐지 및 분류(Fault Detection and Classification, FDC)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. FDC를 수행하기 위하여 다양한 반도체 장비에 갖가지 종류의 센서를 부착하여 일정한 시간 간격으로 원하는 값을 측정하여 이상을 탐지한다.

가상 계측(Virtual Metrology, VM)은 최근 지속적으로 필요성이 강조되고 있는 새로운 기술로서 공정 중 얻게 되는 여러 센서들의 값을 이용하여 직접적인 물리적 계측 없이 실제 wafer의 공정 결과를 예측하는 것이다.[3] 실제 공정에서는 각 공정이 끝난 후 해당 공정이 정상적으로 진행이 되었는지 wafer 계측을 통해 알아본다. 정상적인 결과가 나왔을 경우 다음 공정으로 순서가 넘어가게 되고 그렇지 않은 비정상적인 결과가 나왔을 경우 추가적인 공정을 통하여 수정을 하게 되고 최악의 경우에는 해당 wafer를 버리는 수도 생긴다. 이때 가상 계측이 적용이 된다

면 매 공정마다 계측을 하지 않고도 wafer의 공정 결과를 알 수 있게 되어 계측에 소비되는 시간을 줄일 수 있어 그만큼 생산에 필요한 시간을 단축시킬 수 있으며 계측기의 수요를 줄일 수 있기 때문에 비용 측면에서도 큰 효과가 생길 것이다.

하지만 이러한 큰 효과를 기대할 수 있는 공정 진단과 가상 계측 기술이 아직 반도체 제조 공정 중 플라즈마를 이용한 공정에는 적용이 되지는 않고 있다. 그 이유는 정확도와 물리적 해석의 한계 때문이다. 지금까지의 공정 진단과 가상 계측은 주로 통계적인 방법에 기인하여 개발이 되었다. 즉 그림 1.4에서 보이는바와 같이 플라즈마 공정임에도 불구하고 최근까지의 반도체 공정 가상 계측은 플라즈마는 블랙박스로 보고 장치에 부착된 센서들의 값과 공정 결과를 통계적으로 분석하였다.

그렇기 때문에 통계적인 분석의 한계는 처리 인자에 대한 통계적 의미 이상의 물리적 의미를 해석하기 힘들어 블랙박스 속의 플라즈마 역할에 대해서 추론할 뿐 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 이 결과를 공정 제어 등에 적용함에 신뢰성을 제고함에 있어 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 통계적으로 처리되는 인자를 블랙박스의 물리적 성향을 해설할 수 있는 인자를 포함시켜 통계적 처리 방법이 갖는 한계를 극복해야만 하며 이는 본 연구의 목적이기도 하다.

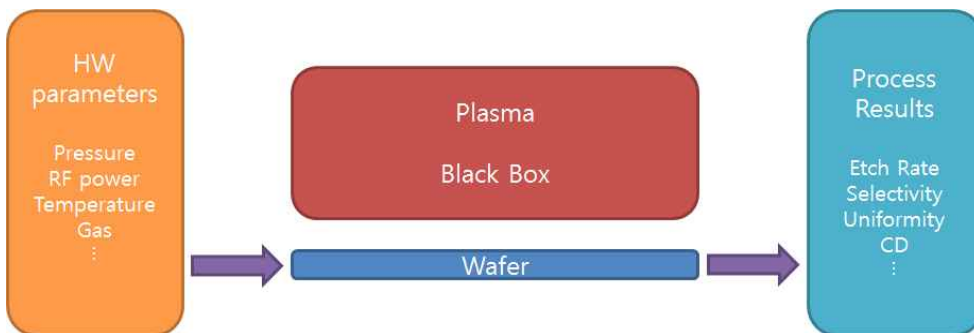


그림 1.4. 현재까지의 플라즈마 공정 진단 기술 - 플라즈마를 배제한 장치 신호들의 통계적 기법을 통해 이뤄지고 있음

1.3 삼중 주파수 용량 결합형 플라즈마

Triple Frequency Capacitively Coupled Plasma

산화물 식각을 위한 플라즈마 공정 장치로는 Capacitively Coupled Plasma(CCP)가 주로 사용된다. 그중 40MHz 이상의 초고주파(VHF) 전원을 Source power로 사용하고 수MHz의 저주파(LF) 전원을 Bias power로 사용하는 Dual Frequency CCP(DF-CCP) 장치가 반도체 제조 산업계에 널리 통용되고 있다. 이러한 장치들의 특징은 초고주파 전원을 이용하여 기판에 입사하는 ion flux를 제어하고, 저주파 전원을 이용하여 기판에 입사하는 ion energy를 제어한다.

하지만 초고주파가 이용될 경우 standing wave effect에 의하여 전력을 높게 사용할 경우 플라즈마 밀도의 nonuniformity가 악화되는 현상이 나타난다.[4] 이러한 플라즈마 밀도의 산포 문제는 식각 결과로 직결되어 식각 공정 수율 악화를 유발한다. 그러나 플라즈마 밀도 측면의 장점 때문에 초고주파 전원의 사용은 불가피한 상황이다.

그림 1.5는 기존의 DF-CCP와 최근 제안된 Triple Frequency CCP의 구조를 모식화한 것으로 각 장치에 활용된 전원의 연결 구조를 보여준다. DF-CCP는 주로 상부 전극에 초고주파 전원을 연결하고 하부 전극에 저주파 전원을 연결한다. TF-CCP는 DF-CCP의 단점을 극복하기 위한 발전된 형태로 초고주파와 저주파 사이의 주파수인 중간 주파수 영역의 고주파를 이용하는 Bias power를 추가적으로 장착하여 초고주파와 저주파가 갖는 특성을 모두 제어할 수 있는 특성을 이용하여 식각률, 선택비, uniformity등 장치의 성능 극대화를 하였다. 하지만 여기서 사용된 HF bias power의 역할, 즉 입사 이온 에너지에 미치는 역할 및 이온 flux에 미치는 역할에 대한 연구가 미진한 상태이다.

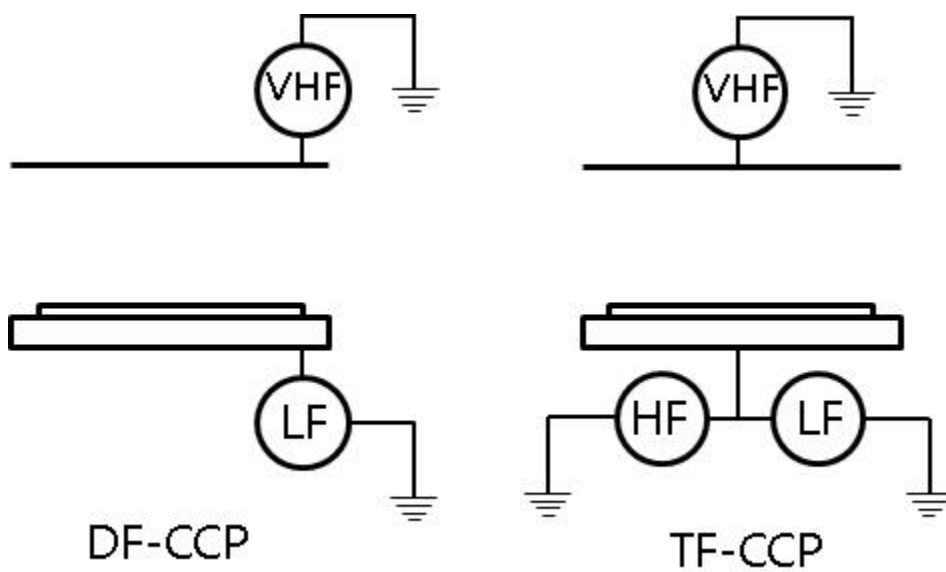


그림 1.5. Dual Frequency CCP와 Triple Frequency CCP

1.4 연구 동기

Triple Frequency CCP를 이용한 식각 공정에서 각 주파수의 전력에 의한 식각 결과의 특성 중 13.56MHz power에 의한 비선형성이 발견되었다. 그림 1.6은 장치 운전 기준 조건에 따라 각 주파수 전력 인자의 10% 변동을 주었을 때 식각률의 변동에 대한 결과이다.

장치 운전 기준 조건은 100MHz 300W, 13.56MHz 1KW, 2MHz 3KW의 저전력, 저밀도 영역 조건과 100MHz 500W, 13.56MHz 2KW, 2MHz 3KW의 고전력, 고밀도 영역이다.

100MHz 전력의 10% 변동에 의한 식각률의 변동은 두 운전 기준 조건 모두에서 오차범위 내에서 큰 변화를 보이지 않는다고 할 수 있다. 2MHz 전력의 10% 변동에 의한 식각률의 변동 역시 두 운전 기준 조건 모두에서 오차범위 내에서 평균 4%에서 최대 5%까지 식각률 상승 효과를 보인다.

반면에 13.56MHz 전력은 운전 조건에 따라 큰 차이를 나타낸다. 저밀도 영역에서는 13.56MHz 전력의 10% 변동에 의하여 3% 정도의 식각률 상승 효과가 나타나지만 고밀도 영역에서는 오차범위 내에서 큰 변화가 없다고 할 수 있다.

하지만 이러한 13.56MHz 전력에 의한 식각 결과의 비선형성에 대한 연구는 아직 깊이있게 이뤄지지 않아왔으나 중간 주파수인 13.56MHz 전력이 미세 공정을 제어하는 데 있어서 최적의 조건이라 할 수 있다. 그 이유는 2MHz의 경우 식각률에 큰 효과를 보여 식각 제어에 적합하다고 생각 할 수 있으나 그 변동의 폭이 너무 크기 때문에 미세 공정 제어에는 적합하지 않다. 전원장치의 특성상 작은 크기의 변동을 보장할 수 없기 때문이다. 예를 들어 2MHz 10KW 전원장치에서 3KW를 사용한 기준 공정에서 식각률 3% 변동을 위하여 미세 제어를 할 경우 그림의 결과에 따르면 2MHz 기준 조건에서 5%를 증가시켜줘야 한다. 즉 3000W에서 150W를 증가 시켜야 하는데 이는 10KW 전원장치 기준

1.5% 변동으로 매우 작은 값이기 때문에 그 정확한 값을 보장하기 힘들다. 실제로 양산 기준으로 10% 이상의 변동을 정확한 값으로 보장할 수 있기 때문에 그 이하의 작은 변동으로는 사용하지 않는다.

따라서 식각 미세 제어에는 13.56MHz 전원이 적합하지만 앞서 보인 운전 조건에 따른 비선형성이 해석되지 않은 이상 이 전원을 이용하여 미세 제어를 하는 데에도 위험성이 따르게 된다. 그러므로 13.56MHz 전원의 운전 조건에 따른 식각 공정의 비선형성에 대한 연구가 필요한 상황이다.

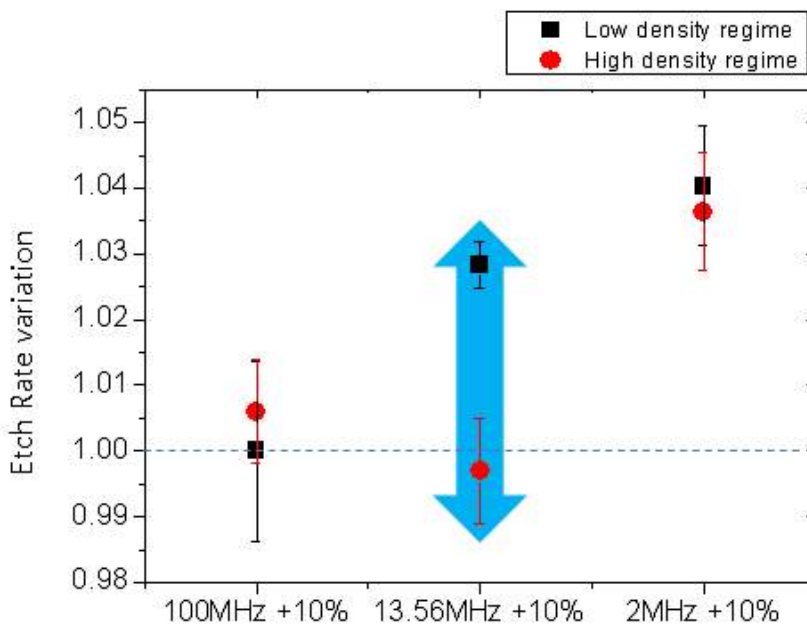


그림 1.6. Triple Frequency CCP에서 각 전력인자의 10% 변동에 따른 Etch Rate의 변화율

1.5 연구 목표

1.2장과 1.4장에서 밝혔듯이 플라즈마를 이용한 반도체 식각 공정의 생산성 향상을 위하여 플라즈마 공정 진단과 공정 제어 기술의 개발이 필수적인 상황이다. 하지만 플라즈마의 비선형적인 거동 특성의 해석이 없이는 공정 진단의 정확도를 보장할 수 없으며 공정 제어 또한 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 Triple Frequency CCP장치의 플라즈마의 전력 의존성을 해석하여 공정 진단에 접목함으로써 그 정확도를 높이고 전력에 의한 식각 공정의 변동을 예측함으로써 식각 공정을 제어할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 그림 1.7에서 본 연구의 목표와 진행 방향을 도식화 하였다. Plasma Circuit Model 기반의 장치 특성 해석을 통해 장치 운전 조건을 정의하고 이에 따라 Plasma 해석 기반의 모니터링 인자와 제어인자를 도출하여 Plasma 거동 특성 해석을 기반으로 하는 공정 진단과 제어 방법론을 만드는 것이다.

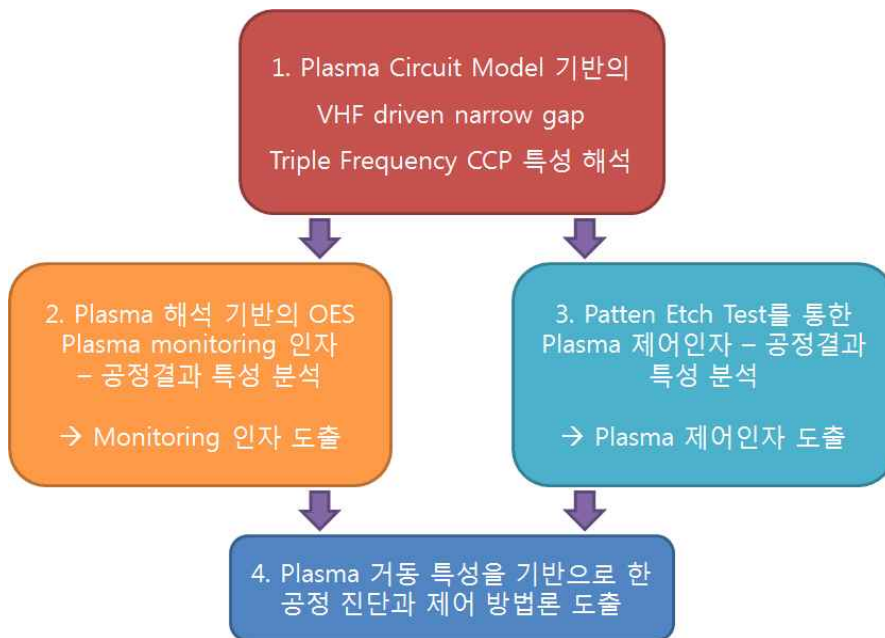


그림 1.7. 본 연구의 목표와 연구 진행 방향

제2장. 실험 장치 구성

이 장에서는 전력 의존 플라즈마 특성 연구와 식각 공정 연구에 사용된 Triple Frequency CCP 식각 장치와 장치의 운전 조건 그리고 식각에 사용된 시료에 대하여 서술하였다.

2.1 Triple Frequency CCP 장치 구성

본 연구에서 전력 의존 플라즈마 특성과 식각 실험의 데이터를 얻기 위해 사용한 Triple Frequency CCP 장치 개략도를 그림 2.1에 나타내었다. 장치는 300mm wafer를 식각하기 위한 장치로서 상부 전극에는 100MHz VHF source 전원을 인가하고 하부 전극에는 13.56MHz HF bias와 2MHz LF bias 전원을 인가한다. 상부 전극의 반경은 200mm이며 하부 전극의 반경은 150mm, 상부 전극과 하부 전극 사이의 거리는 25mm로 전극의 크기 대비 전극 사이의 거리가 짧은 narrow gap 구조를 가진 장치이다. 그리고 장치 벽면까지의 내반경은 300mm로 전극 사이의 중심부 보다 전극과 벽면 사이의 공간이 상대적으로 큰 특징을 갖고 있다. 각 전극과 장치 벽면은 Chiller와 Heater로 일정한 온도로 유지되고 있다. 공정 가스로는 Ar, C4F8, O2를 사용 하였고 이 가스는 GFS(Gas Flow Splitter)를 통하여 상부 전극의 중앙부와 주변부로 비율을 나누어 주입할 수 있도록 되어있다. 장치내의 압력은 APC v/v(Auto Pressure Control Valve)를 이용하여 제어한다. 하부 전극에는 ESC(Electro Static Chuck)가 있어 wafer를 전극에 전기적으로 붙어있을 수 있도록 DC 전원이 연결되어 있고 wafer와 전극 사이에 주입되어 열전달을 할 수 있도록 He이 주입될 수 있도록 되어있다. 따라서 본 식각장치에서 제어 가능한 인자는 앞서 서술한 pressure, 100MHz, 13.56MHz, 2MHz, GFS, Ar flow, C4F8 flow, He In/Out, ESC DC,

Top Temperature, Bottom Temperature, Wall Temperature, Top Heater로 표 2.1에 본 연구에서 사용한 Triple Frequency CCP 장치의 인자별 운전 가능 범위를 요약하였다. 그리고 측정은 OES(Optical Emission Spectroscopy)와 OES probe를 이용하여 플라즈마 방출 빛의 파장과 세기를 측정하였으며 Langmuir Probe(LP)를 이용하여 플라즈마 밀도(n_e)와 온도(T_e)를 측정하였다. 이때 사용한 OES는 Verity Instruments SD1024F를 사용했으며 측정범위는 200nm~800nm, 측정 Resolution은 0.5nm이다. OES probe는 OES를 이용하여 위치에 따른 플라즈마 방출 빛을 측정하기 위한 측정 장치로 세라믹 튜브를 플라즈마 내로 삽입하여 튜브를 통하여 특정 위치에서 발생하는 플라즈마의 광신호를 얻을 수 있다.[4]

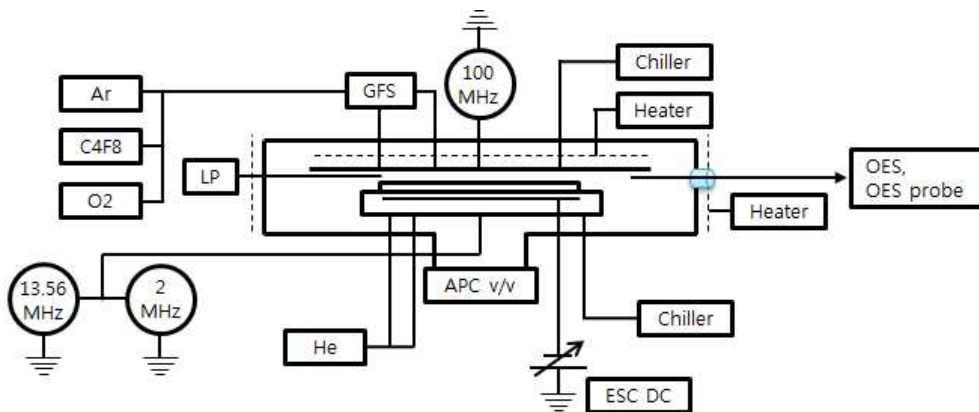


그림 2.1. Triple Frequency CCP 장치 개략도

| 장치 제어 인자 | 운전 범위 | 장치 제어 인자 | 운전 범위 |
|-------------------|------------------|-------------|--------------------|
| Pressure | 15mT ~ 200mT | He Inner | 5Torr ~ 10Torr |
| 100MHz power | 300W ~ 1500W | He Outer | 15Torr ~ 25Torr |
| 13.56MHz power | 500W ~ 2000W | ESC DC | 1500V ~ 2500V |
| 2MHz power | 500W ~ 10000W | Top Temp | 30℃ ~ 120℃ |
| GFS | 20% ~ 80% | Bottom Temp | -20℃ ~ 30℃ |
| Ar Flow | ~ 1000sccm | Wall Temp | 60℃ |
| C4F8 Flow | ~ 100sccm | Top Heater | 100℃ ~ 200℃ |
| O2 Flow | ~ 300sccm | | |

표 2.1. Triple Frequency CCP 장치 Spec

2.2 장치 운전 조건

앞의 1.4장에서 제시한 그림 1.6의 13.56MHz 식각 결과의 비선형성에 대한 실험 결과에서 기준 조건으로 사용한 장치 운전 조건은 두가지로 100MHz 300W, 13.56MHz 1000W를 사용한 저전력, 저밀도 운전 조건과 100MHz 500W, 13.56MHz 2000W를 사용한 고전력, 고밀도 운전 조건이다. 장치 전력 인자 조건 이외의 장치 운전 인자의 조건은 표 2.2에 정리하였다. 이후 제시하는 데이터의 기본 운전 조건들은 모두 표 2.2에 준한다.

| 장치 운전 인자 | 저전력, 저밀도 조건 | 고전력, 고밀도 조건 |
|----------------|-------------|-------------|
| Pressure | 20mT | 20mT |
| 100MHz power | 300W | 500W |
| 13.56MHz power | 1000W | 2000W |
| 2MHz power | 3000W | 3000W |
| GFS | 50% | 50% |
| Ar Flow | 400sccm | 400sccm |
| C4F8 Flow | 50sccm | 50sccm |
| O2 Flow | 30sccm | 30sccm |
| He Inner | 10Torr | 10Torr |
| He Outer | 20Torr | 20Torr |
| ESC DC | 2500V | 2500V |
| Top Temp | 45℃ | 45℃ |
| Bottom Temp | 20℃ | 20℃ |
| Wall Temp | 60℃ | 60℃ |
| Top Heater | 110℃ | 110℃ |

표 2.2. 장치 운전 조건

2.3 식각 시료

식각 실험은 DRAM 공정 중 Metal Contact(MC) Etch 공정 시료를 사용하여 실험 하였다. DRAM의 일반적인 단면 구조는 그림 2.2와 같다. MC 공정은 dielectric 막질인 SiO₂ 막질을 contact hole 형태로 식각하는 dielectric contact etch 공정으로 식각하는 SiO₂ 막질의 두께가 2,000nm~3,000nm로 매우 두꺼운 특징을 가지고 있다.[1] 따라서 식각 공정 시간이 매우 긴 공정 중 하나이며 생산성을 고려할 때 본 실험에서 사용한 Triple Frequency CCP 장치는 100MHz VHF Source에 의한 높은 플라즈마와 13.56MHz와 2MHz dual bias power에 의한 ion energy 극대화로 높은 식각률을 얻을 수 있어 MC 공정의 생산성을 향상 시키는데 최적의 장치임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 시료의 상세 스펙은 그림 2.3에 정리하였다.

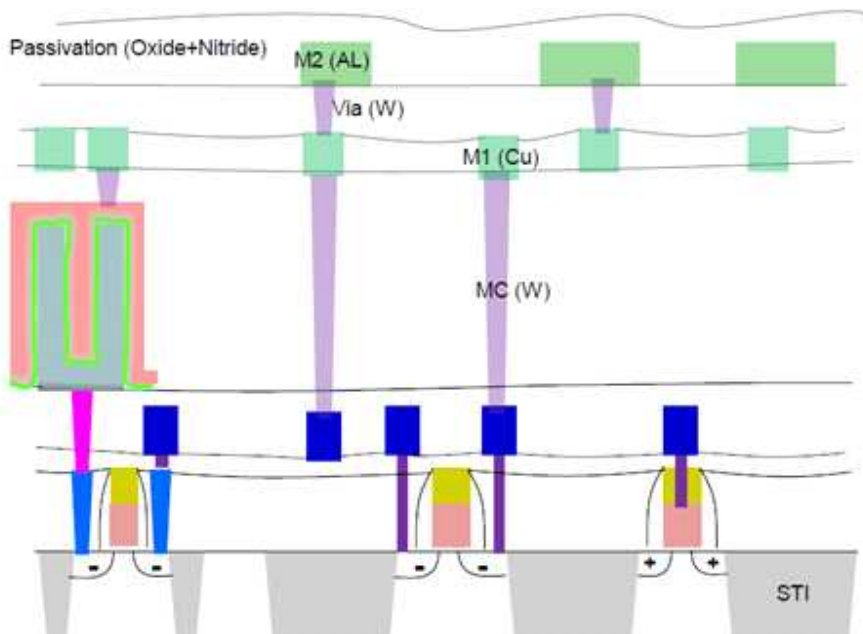


그림 2.2. DRAM 단면 구조

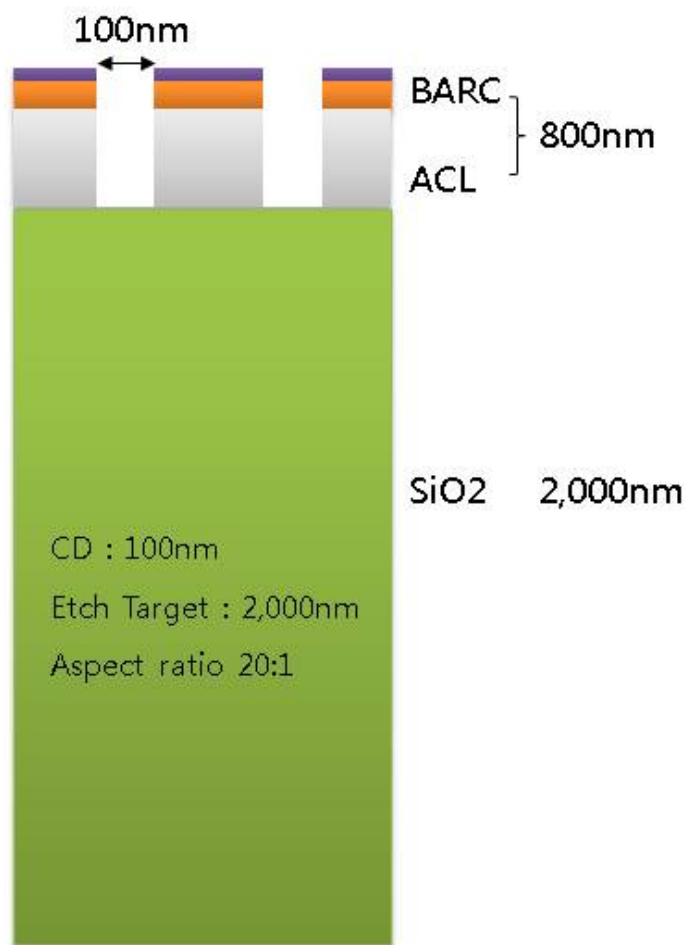


그림 2.3. DRAM MC 시료 구조

제3장. 전력인자에 의한 플라즈마 특성

3.1 플라즈마 주파수와 장치 운전 주파수

플라즈마 내부의 한 부분이 전기장 등의 외적인 효과로 인해 순간적으로 전기적 중성으로부터 벗어나게 되면 플라즈마는 중성을 회복하기 위한 복원력이 발생하게 된다. 이 복원력에 의해 순전하가 0이 되어 중성이 회복되었을 때 관성에 의해 지나침 현상이 일어나고 다시 반대 복원력이 생기게 된다. 이러한 현상의 반복으로 플라즈마 진동 현상이 발생하게 된다. 이때 전자가 진동하는 진동 주파수를 ω_e 라고 하고 이를 plasma electron frequency라고 한다. 이 값은 식 3.1과 같고 외부 전기장의 시간에 따른 변화가 있을 때 이 전기장의 변화를 따라 반응을 할 수 있는 최대 주파수에 해당 된다. 여기서 n_e 는 electron density, e 는 electron charge, m_e 는 electron의 질량, ϵ_0 는 유전상수를 의미하고, ω_e 는 플라즈마 밀도인 n_e 에 의해 결정되는 플라즈마 물성 값이다.

$$\omega_e = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (3.1)$$

즉 전기장의 변화가 이 진동수보다 작으면 전자는 전기장의 변화에 따라 움직이게 되고 이 진동수보다 전기장의 변화가 더 빠르게 되면 전자는 이 전기장의 변화에 반응하지 못하게 되는 것이다. 마찬가지로 plasma ion frequency를 ω_i 라고 하면 그 값은 식 3.2와 같게 되고 이온의 질량이 전자의 질량에 비해 매우 크기 때문에 plasma ion frequency는 plasma electron frequency 보다 작게 된다. 여기서 n_i 는 ion density, m_i 는 ion의 질량을 의미한다.

$$\omega_i = \sqrt{\frac{n_i e^2}{m_i \epsilon_0}} \quad (3.2)$$

본 실험에서 사용한 Triple Frequency CCP장치의 운전 영역에서 electron density는 $n_e \approx 5 \times 10^{16} m^{-3}$ 이므로 electron frequency는 식 3.3과 같고 ion frequency는 식 3.4와 같다.

$$f_e = \omega_e / 2\pi = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} / 2\pi \approx 2.0 GHz \quad (3.3)$$

$$f_i = \omega_i / 2\pi = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_i \epsilon_0}} / 2\pi \approx 11.0 MHz (F^+), 7.4 MHz (Ar^+) \quad (3.4)$$

이 값을 장치를 운전하는 100MHz, 13.56MHz, 2MHz와 비교해보면 그림 3.1에서 보는바와 같이 electron frequency는 1.5GHz로 매우 크기 때문에 모든 장치 운전 주파수에 반응을 하게 되고 ion frequency는 100MHz보다는 작고 13.56MHz와 비슷한 값을 가지게 되어 100MHz에는 반응하지 못하고 13.56MHz와 2MHz에 의해서는 반응하게 된다.[2]

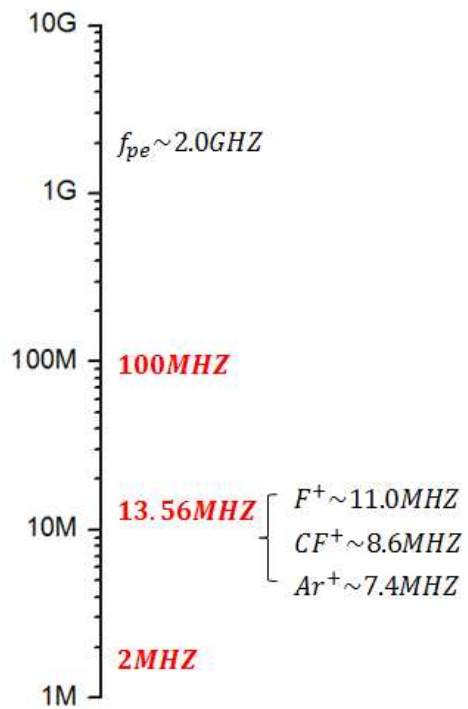


그림 3.1. 플라스마 주파수와 장치 운전 주파수

3.2 100MHz 초고주파 전원의 역할

플라즈마를 가열하는 주된 메커니즘에는 Ohmic heating과 Stochastic heating이 있다. Ohmic heating은 collisional heating으로 주로 고압 방전 조건에서 주된 가열 효과를 나타낸다. 이에 반해 Stochastic heating은 collisionless heating으로 주로 저압 방전 조건에서 주된 가열 효과를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 방전 조건은 저압 공정 조건으로 Stochastic heating이 주된 플라즈마 가열 메커니즘이라 할 수 있다. Stochastic heating은 식 3.5와 같이 주파수의 제곱에 비례하고 RF Voltage에 비례하는 특징이 있다.[2]

$$S_{stoc} \propto \omega^2 V_{rf} \quad (3.5)$$

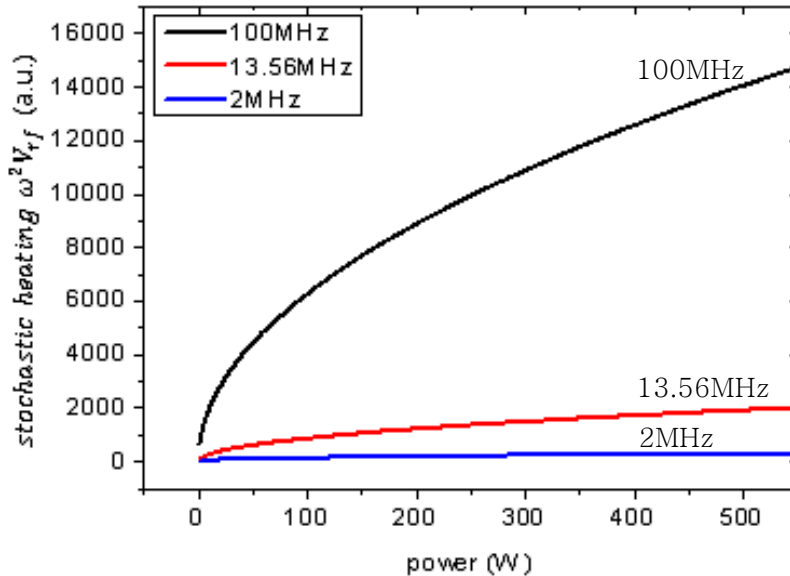


그림 3.2. 주파수에 따른 Stochastic heating 효율

여기서 RF Voltage는 식 3.6과 같이 input power의 1/2승에 비례하고 주파수에 반비례 한다.

$$V_{rf} \propto S_{abs}^{1/2} / \omega \quad (3.6)$$

두 식을 이용하여 세 개의 주파수별 Stochastic heating에 끼치는 영향을 알아보면 그림 3.2에서 보이는 바와 같이 100MHz에 의한 효과가 다른 주파수에 의한 효과보다 매우 큰 값을 갖는 것을 알 수 있으며 다음으로 13.56MHz에 의한 효과가 크고 2MHz에 의한 효과가 가장 적은 것을 알 수 있다.[2]

따라서 본 실험에서 사용된 Triple Frequency CCP에 사용된 100MHz 전원은 고밀도 플라즈마를 얻는데 매우 효율적이라 할 수 있다. 즉, 그림 3.3에 나타난 것처럼 플라즈마 밀도는 주파수의 제곱에 비례하여 증가하고 이렇게 얻은 고밀도 플라즈마는 그림 3.4에서 보이는 바와 같이 식각 공정에 있어 식각률을 높이는데 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 식각률을 올리기 위해 필요한 밀도 증진에는 고주파 전력이 핵심 인자임을 예상할 수 있으나 고주파 전력을 높임으로써 유발되는 내재된 플라즈마 현상인 정상파 효과가 생겨 식각 균일도의 문제가 악화된다. 따라서 최적 공정을 위해서는 고주파 전력을 적절한 크기로 선택하는 기술이 관건이 됨을 알 수 있다.

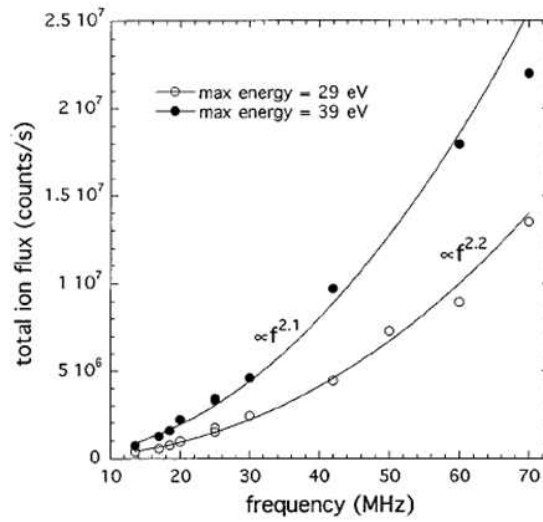


그림 3.3. 운전 주파수와 ion flux와의 관계 [5]

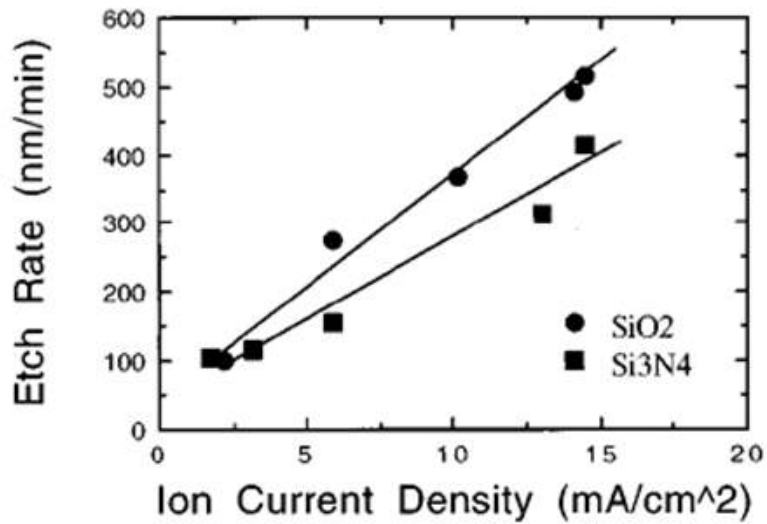


그림 3.4. Ion Current Density와 Etch Rate과의 관계 [6]

100MHz에 의한 고밀도 플라스마와 높은 식각률을 얻을 수 있는 장점에 반해 100MHz에 의한 플라스마 밀도의 균일도 측면에서는 문제점을 갖고 있다. 주파수가 높아질수록 파장의 길이가 짧아져 전극의 크기와 비슷한 수준이 되면 플라스마 밀도의 분포가 정상파 효과(Standing wave effect)로 균일도가 나빠지게 된다. 그림 3.5는 Perret 등에 의해 보고된 40cm×40cm 사이즈 공간에서 150mTorr 플라스마에 나타나는 정상파 효과를 나타낸 것이다. 13.56MHz, 60MHz, 81.36MHz 전력이 인가된 경우의 그림 3.5와 같이 주파수가 높아질수록 플라스마 밀도의 균일도가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 13.56MHz 조건 보다 60MHz와 81.36MHz로 주파수가 높아질수록 중심부의 플라스마 밀도가 높아져서 균일도가 나빠진다.

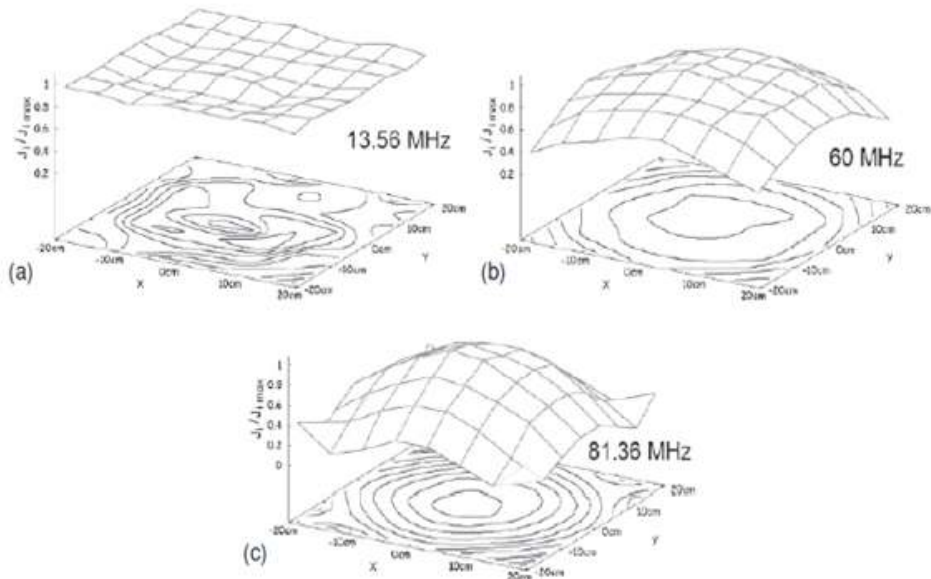


그림 3.5. 주파수에 따른 플라스마 밀도 분포[7]

그림 3.6은 100MHz 500W, 1000W, 1500W 조건에서 OES를 이용하여 750nm intensity를 측정한 결과로서 전극 중심부의 intensity가 강하고 중심부에서 멀어질수록 intensity가 약해지는 결과를 보인다. 중심부와 200mm 지점의 intensity의 차이는 전력이 높아질수록 커지는 현상이 관찰되고 있고, 이를 보완하기 위하여 100MHz 이외에 추가적으로 13.56MHz와 2MHz RF 전원을 이용한 것이 Triple Frequency CCP이다.

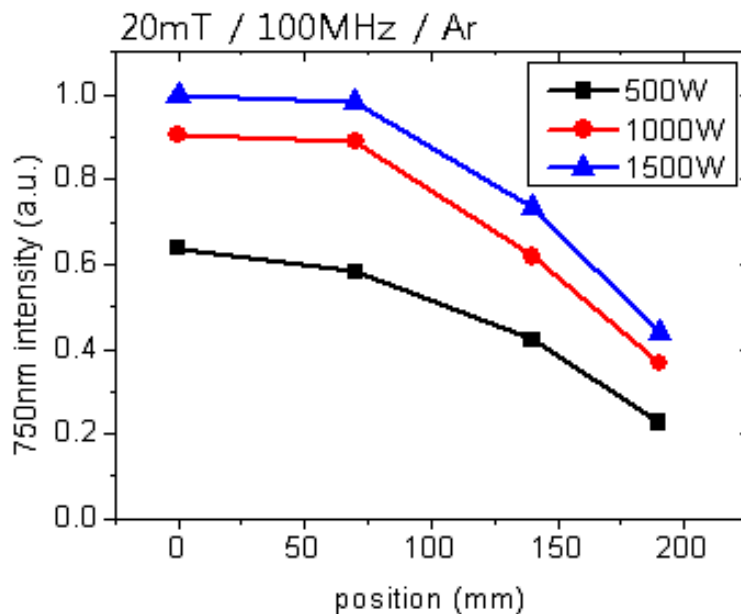


그림 3.6. 100MHz Power에 따른 OES 750nm intensity 분포

3.3 Narrow Gap CCP에서 100MHz 전원에 의한 운전 영역 변화

그림 3.7과 그림 3.8은 100MHz power를 20mT Ar only 조건에서 50W에서 1500W까지 power를 scan하면서 플라즈마 밀도를 측정한 결과이다. 측정은 Langmuir Probe를 이용하여 장치 중심으로부터 70mm 위치에서 측정하였고 OES probe를 이용하여 0mm, 70mm, 140mm, 190mm 위치에서 측정하였다. Langmuir Probe를 이용한 플라즈마 밀도 측정 결과와 OES를 이용한 플라즈마 밀도 측정 결과는 그림에서 보여주는 바와 같이 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

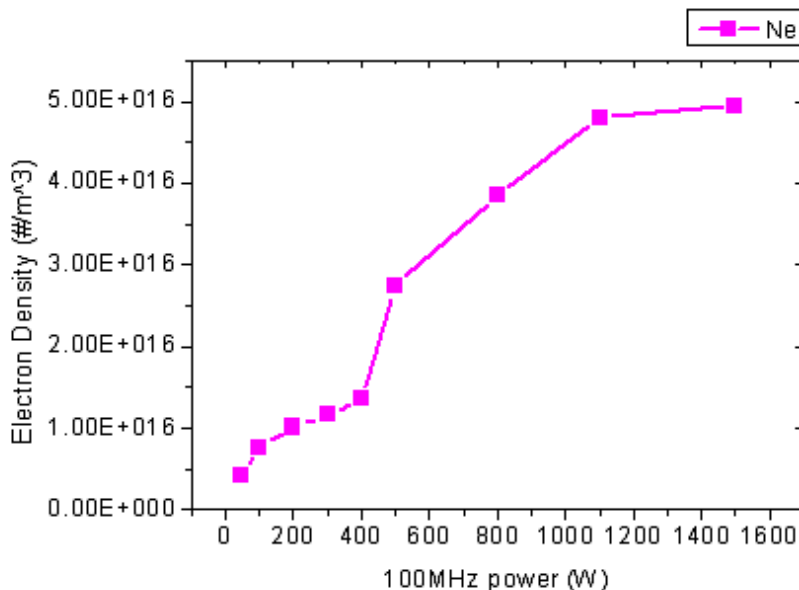


그림 3.7. Langmuir Probe로 전극 70mm 위치에서 측정한 100MHz Power에 따른 플라즈마 밀도

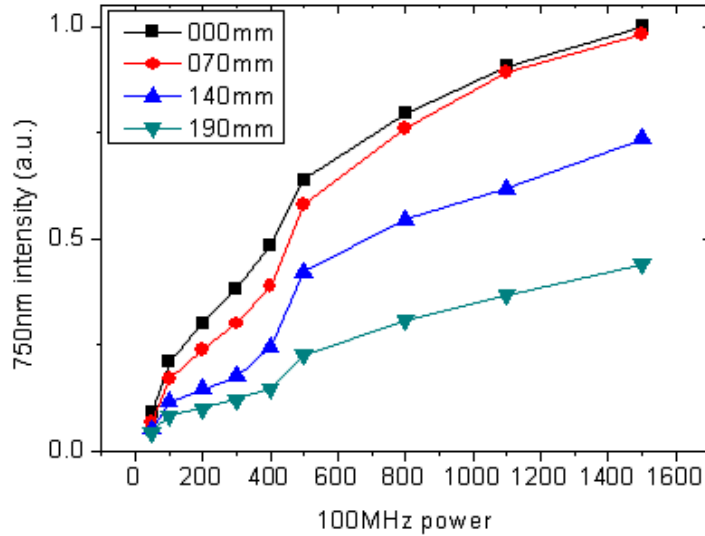


그림 3.8. OES Probe로 전극 0mm, 70mm, 140mm, 190mm에서 측정한 100MHz Power에 따른 750nm intensity

여기서 특이점은 400W와 500W 사이에서 플라즈마 밀도가 급격하게 증가한 후 증가세가 둔화된다는 것이다. 이 현상의 원인은 Plasma Series Resonance(PSR)로 해석할 수 있다.

PSR이란 플라즈마 장치를 Circuit Model로 해석 했을 때 플라즈마 sheath의 capacitance 성분과 플라즈마의 inductance 성분 간의 LC resonance 현상이다. 본 연구에서 사용된 Triple Frequency CCP는 narrow gap을 특징으로 하는 장치로서 상부 전극과 하부 전극의 거리가 매우 짧다. 벽면은 면적이 각 전극의 면적보다 훨씬 넓고 접지가 되어 있어 적극에 비해 매우 낮은 sheath 전위를 갖게 된다. 따라서 전극에 형성되는 sheath 보다 벽면에서 낮은 sheath 임피던스를 갖게 된다. 하지만 전극간 거리가 짧을 경우, 플라즈마 벌크에 의한 임피던스가 줄

어들어 상하부 전극 사이의 임피던스가 전극과 벽면 사이의 임피던스와 유사한 크기를 갖게되어 결과적으로 상하부 전극 사이의 전류 흐름과 각 전극과 벽면 사이의 흐름을 모두 고려해야하는 Triode의 특성을 갖게된다. 그림 3.9의 circuit model 모식도에서 보이는 바와 같이 상부 전극과 하부 전극 사이의 current path뿐만 아니라 전극과 wall 사이의 current path도 존재 한다. 이때 각각의 current path에서 capacitance 성분과 inductance 성분이 존재하게 되는데 이들 간의 LC resonance 현상이 바로 PSR이다.[8] 각 current path가 가지고 있는 impedance는 식 3.8과 같다.

$$Z \cong j \frac{1}{\omega C_{sh}} + j\omega L_p + R_{sh} + R_p \quad (3.8)$$

$$C_{sh} \propto \sqrt{n} V^{-3/4} \quad (3.9)$$

$$L_p \propto \frac{1}{n} \quad (3.10)$$

여기서 C_{sh} 는 sheath capacitance, L_p 는 plasma inductance, R_{sh} 는 sheath resistance, R_p 는 plasma resistance를 의미한다. capacitance와 inductance는 plasma density의 함수이기 때문에 특정 밀도 조건에서 플라즈마 inductance와 sheath capacitance가 주 전력 주파수와 resonance 조건을 만들게 된다. 따라서 플라즈마 밀도는 PSR 조건의 유지에 주요한 변수가 된다. TF-CCP에서는 밀도에 영향을 주는 주파수는 100MHz와 bias power 중 13.56MHz이며 13.56MHz는 현재의 운전 조건에서 주파수가 낮아 스스로 PSR 조건을 만족하지 못하고 단지 100MHz의 PSR 현상의 유지에 민감하게 기여하는 인자가 된다.

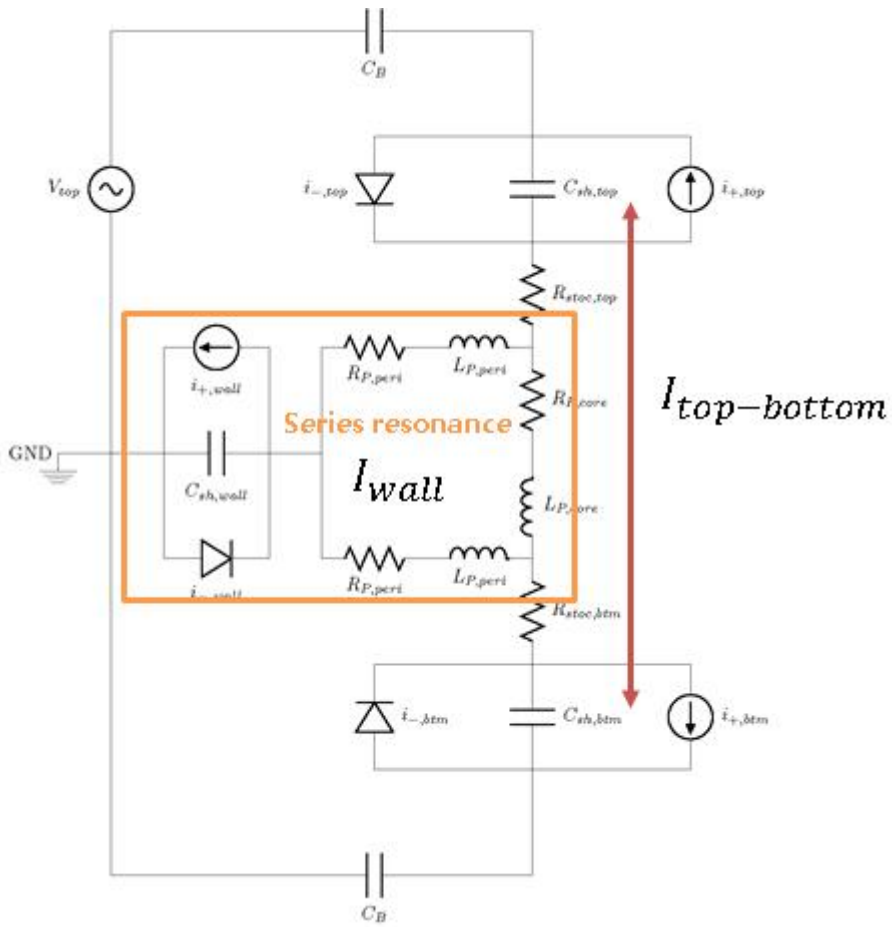


그림 3.9. Triple Frequency CCP의 Circuit Model[8]

3.4 13.56MHz와 2MHz에 의한 Bias 효과

앞서 3.1장에서 밝혔듯이 본 연구에서 사용한 장치의 운전 주파수 중 13.56MHz는 ion frequency와 비슷하고 2MHz는 ion frequency보다 작게 된다. 따라서 ion은 이 두 주파수에 의하여 영향을 받게 된다. 전극에 걸리는 RF Voltage는 식 3.6과 같이 input power의 1/2승에 비례하고 주파수에 반비례한다.[2] 그림3.10은 각 전원의 주파수별 인가 전력 대비 RF Voltage를 계산한 결과를 나타낸다.

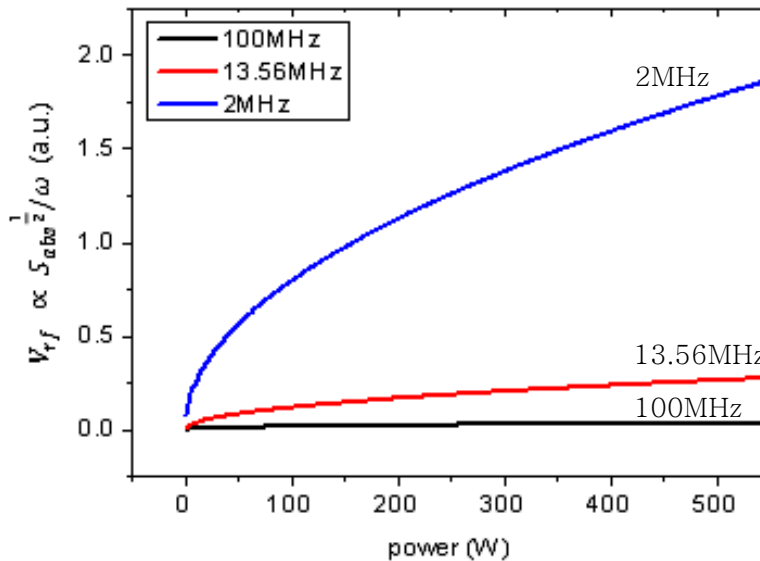


그림 3.10. 주파수에 따른 RF Voltage

각 주파수별 뚜렷한 기울기 차이가 보여주듯이 같은 input power에서 2MHz에 의한 RF Voltage가 13.56MHz에 의한 RF Voltage보다 크다는 것을 알 수 있다. 그림 3.11은 Bias 전원의 조합별 Bias Voltage의 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 3.11에서 볼 수 있듯이 같은 전극에 걸리는 RF Voltage는 두 각 RF 전원에 의한 RF Voltage의 합과 비례한다. 이와 같은 현상은 Shannon 등에 의해 보고된 바 있다.[9] 13.56MHz power만을 인가하였을 때의 RF Voltage와 2MHz power만을 인가하였을 때의 RF Voltage의 합과 13.56MHz와 2MHz power를 동시에 인가하였을 때의 값이 같음을 알 수 있다.

RF Voltage가 클수록 ion이 가속되는 에너지가 크게 되어 Etch Rate이 증가하는 결과를 얻을 수 있다. 앞의 3.2절의 결과와 종합해보면 Etch Rate은 플라즈마 밀도와 입사 이온의 에너지에 비례한다는 것을 알 수 있다. 이러한 bias 효과로 그림 3.12와 같이 식각률 증가 효과가 나타난다. 식각률이 442nm/min인 13.56MHz 1000W, 2MHz 3000W 조건보다 13.56MHz 1100W, 2MHz 3000W 조건에서 식각률이 454nm/min으로 높게 나타나며, 13.56MHz 1000W, 2MHz 3300W 조건에서는 459nm/min으로 더 높은 식각률을 나타낸다.

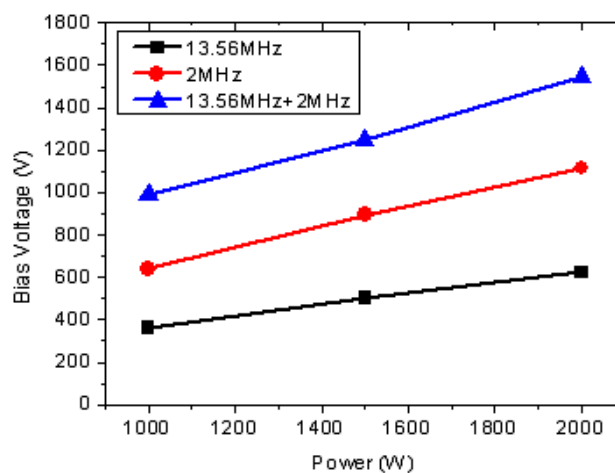


그림 3.11. 13.56MHz, 2MHz power에 따른 Bias Voltage

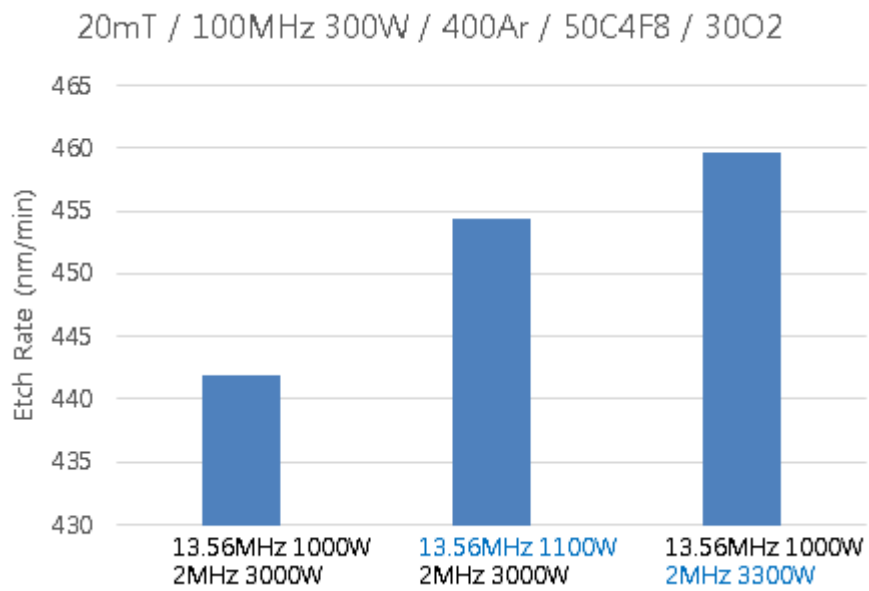


그림 3.12. 13.56MHz, 2MHz power에 따른 Etch Rate

3.5 13.56MHz와 2MHz에 의한 Plasma density 변화

식각 공정 특성을 지배하는 인자로서 앞장에서 설명한 13.56MHz와 2MHz 전원에 의한 bias 효과에 이어, plasma density 변화에 대한 분석이 필요하다.

그림 3.13은 압력 20mT, gas 조건은 Ar, 100MHz power는 300W, 500W, 800W 조건에서 13.56MHz power를 0W에서 2000W까지 500W 간격으로 올라가면서 OES로 플라즈마 밀도를 측정한 결과이다. 전반적으로 13.56MHz power가 증가하면 플라즈마 밀도 또한 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 그 경향은 100MHz power에 따라 다르게 나타난다.

100MHz power가 500W, 800W인 경우 13.56MHz power가 높아질수록 플라즈마 밀도가 증가하지만 그 증가율을 크지 않다. 반면에 100MHz 300W 조건에서는 13.56MHz 1000W 까지는 플라즈마 밀도 증가율이 매우 크며 이후 2000W 까지는 100MHz 500W, 800W의 경우와 마찬가지로 증가율이 크지 않은 비선형적인 플라즈마 밀도 변화 경향을 보인다. 이는 앞서 3.2장에서 설명한 100MHz에 의한 PSR현상과 맞물려 해석할 수 있다. 즉, 100MHz low power 영역에서는 13.56MHz power 추가에 의한 밀도 상승으로 PSR현상이 촉진되어 나타나며 이를 전 후로 13.56MHz 전원이 플라즈마 밀도에 미치는 효과가 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 앞서 서론에서 이야기한 13.56MHz power에 의한 식각 공정 결과의 비선형성의 해석이 가능하다. 저전력, 저밀도 공정 조건에서는 13.56MHz에 의하여 플라즈마 밀도가 상승하기 때문에 식각률도 함께 증가를 하고, 고전력, 고밀도 공정 조건에서는 13.56MHz에 의하여 플라즈마 밀도의 변화가 거의 없기 때문에 식각률의 변동 또한 없는 것이다. 따라서 13.56MHz power에 의한 비선형적인 플라즈마 밀도 변화 현상을 이해하여야 정밀한 식각 공정 제어가 가능하다고 할 수 있다.

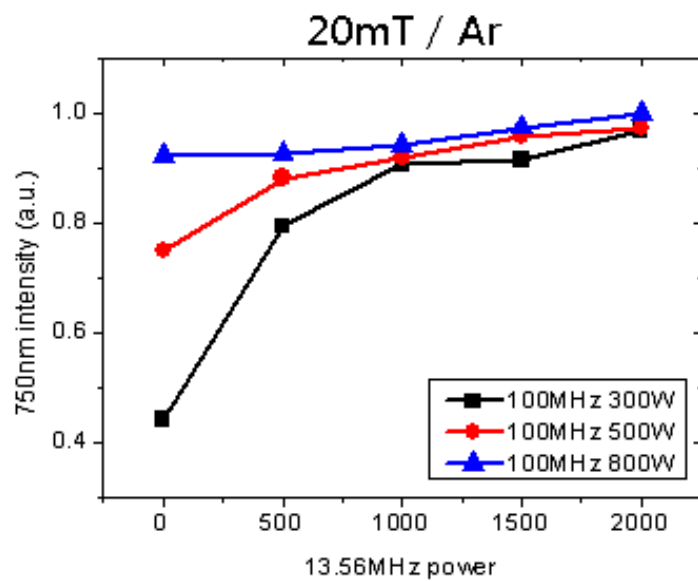


그림 3.13. 13.56MHz power에 따른 OES 750nm intensity

그림 3.14는 2MHz 전원에 의한 플라즈마 밀도의 변화 실험 결과를 나타낸 것이다. 앞서 기술한 13.56MHz 전원의 플라즈마 밀도에 대한 비선형적인 특징과 달리 2MHz에 의한 플라즈마 밀도 변화는 power를 0W에서 2000W까지 500W씩 증가시킴에도 불구하고 변화가 거의 관찰되지 않았다. 따라서 2MHz power는 플라즈마 밀도와 독립적인 운전 인자로 간주가 가능하다고 판단하였다.

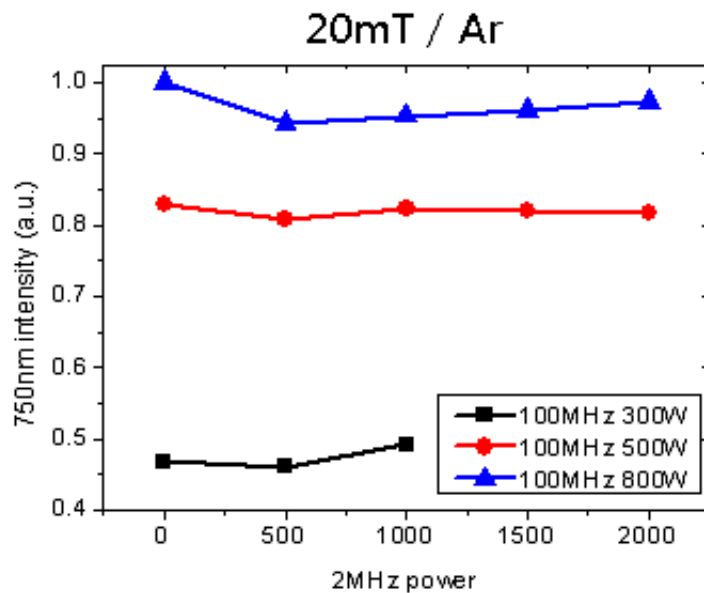


그림 3.14. 2MHz power에 따른 OES 750nm intensity

본 장에서 기술한 Triple Frequency CCP에서 전력인자 변동에 따른 플라즈마 특성 해석 결과를 정리하면 다음과 같다. 100MHz 초고주파 전원에 의하여 높은 플라즈마 밀도를 얻을 수 있지만 Standing wave effect에 의하여 균일도 문제가 발생하기 때문에 높은 전력을 사용하여 공정할 수 없고 13.56MHz, 2MHz의 부가적인 전원의 전력을 사용하여 공정 조건을 정하게 된다. 또한 13.56MHz와 2MHz dual bias 전원에 의하여 기판에 입사하는 이온의 에너지를 극대화하여 높은 식각률을 얻을 수 있다.

추가적으로 초고주파 전원과 narrow gap이라는 장치 특성으로 Plasma Series Resonance 현상이 일어나고 이 현상은 13.56MHz 전원에 의하여 촉진될 수 있으며 이 시점을 전 후로 13.56MHz의 식각 공정 결과에 대한 효과가 바뀌며 이 시점은 장치의 주 공정 영역에 위치하고 있다. 따라서 정밀한 식각 공정 제어를 위해서는 이러한 플라즈마 거동의 특성이 필히 해석되어야 한다.

제4장. 공정 플라즈마 모니터링

이번 장에서는 플라즈마 공정 진단을 위하여 반드시 요구되는 공정 플라즈마의 모니터링 방법에 대하여 논하고자 한다.

4.1 센서 민감도 랭킹 실험

본 연구에 사용된 Triple Frequency CCP 장치는 운전 중 1600개의 OES 센서값과 70개의 FDC센서를 포함한 총 1670개의 센서들의 값이 데이터로서 기록된다. 이렇게 많은 데이터를 모두 사용할 경우 in-situ 모니터링은 현실적으로 불가능에 가깝다. 실시간으로 센서들의 값을 연산 처리하여 원하는 결과 값을 계산하기에는 데이터의 양이 너무 많으므로 공정 제어에 실시간으로 반영을 할 수 없기 때문이다.

그리고 플라즈마의 상태에 따라 센서의 반응하는 형태와 정도도 다르다. 또한 공정 장치를 운전하는 모든 작업자들이 모든 센서의 의미를 알고 플라즈마에 대한 이해도가 높다고 장담할 수 없다. 따라서 플라즈마 공정 모니터링에 필요한 센서를 선택하는 일이 매우 중요할 것이다.

본 연구에서는 센서 민감도 랭킹 방법을 이용하여 센서를 선택하였다. 이 방법은 장치 운전 인자의 일정 수준 변동을 줄 때 반응하는 센서 값들의 변동의 정도를 랭킹화 하여 변동이 큰 순으로 센서를 선택해 모니터링에 사용하는 방법이다. 이 방법을 이용하면 비교적 쉽게 모니터링에 필요한 인자의 선택이 가능하다.[10]

앞서 기술한 바와 같이 표 2.1은 본 연구에서 기준 운전 조건으로 사용한 두가지의 공정 조건이다. 한 조건은 저전력, 저밀도의 운전 조건이고 나머지 한 조건은 고전력, 고밀도의 운전 조건이다. 이는 Plasma Series Resonance에 의하여 13.56MHz 전력의 역할이 바뀌기 전과 후의 조건에 해당 되는 것이다. 센서 민감도 랭킹 실험은 기준 조건에서

그림 4.1과 같이 100MHz, 13.56MHz, 2MHz 전력인자를 각각 10%씩 변동을 주어 20초 공정 진행을 하고 다시 기준조건으로 20초 공정 진행을 하는 방법을 반복하여 각 전력인자의 변동 시 센서 변동의 민감도를 랭킹화 한다.

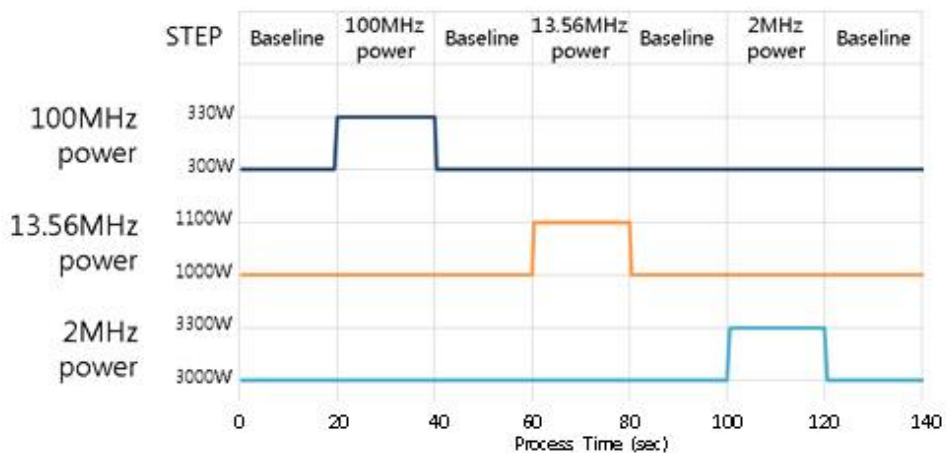


그림 4.1. 센서 민감도 랭킹 실험 조건

4.2 공정 플라즈마 모니터링 인자 선정

본 장에서는 앞서 설명한 센서 민감도 랭킹 실험을 통한 플라즈마 모니터링 인자를 선정하는 방법에 대하여 구체적으로 기술하고자 한다. 센서 민감도 랭킹화에 앞서 1670개의 센서 중 의미 있는 센서를 우선적으로 선정하여 분석에 사용할 센서를 1차적으로 정리하였다. 센서 선정의 규칙은 OES 센서의 경우 그림 4.2에서 보이는 바와 같이 Full spectrum에서 Background를 형성하는 신호는 제외하고 Peak를 형성하고 있는 의미 있는 신호들을 선정하는 방식이다. 결과적으로 표 4.1과 같이 56개의 OES 센서를 선정 하였다. 이때 플라즈마 밀도를 대변하는 Ar 750nm 신호를 제외한 나머지 OES 신호들을 750nm intensity로 normalize하여 플라즈마 밀도와는 독립적인 값을 갖도록 하였다. 그리고 FDC 센서의 경우 장치 인가 전력 변동 특성에 민감하게 반응하는 인자들을 선정하였다. 그림 4.3은 장치 전력 인자를 step function 형태로 변동을 주었을 때 마찬가지로 step function의 형태로 반응하는 센서 중 하나인 Matcher의 cap position을 나타낸 것이다. 이와 같은 변동 경향을 보인 FDC 센서를 민감한 인자로 판단하여 채택을 하였다. 한편 그림 4.4와 같이 step function 형태로 반응하지 않고 steady한 변화를 보이는 센서는 그 변동이 민감하지 않은 것으로 판단하여 제외하였다. 그 결과 FDC 센서는 70개에서 24개로 정리되었고, 표 4.2에 선정 결과를 나타내었다.

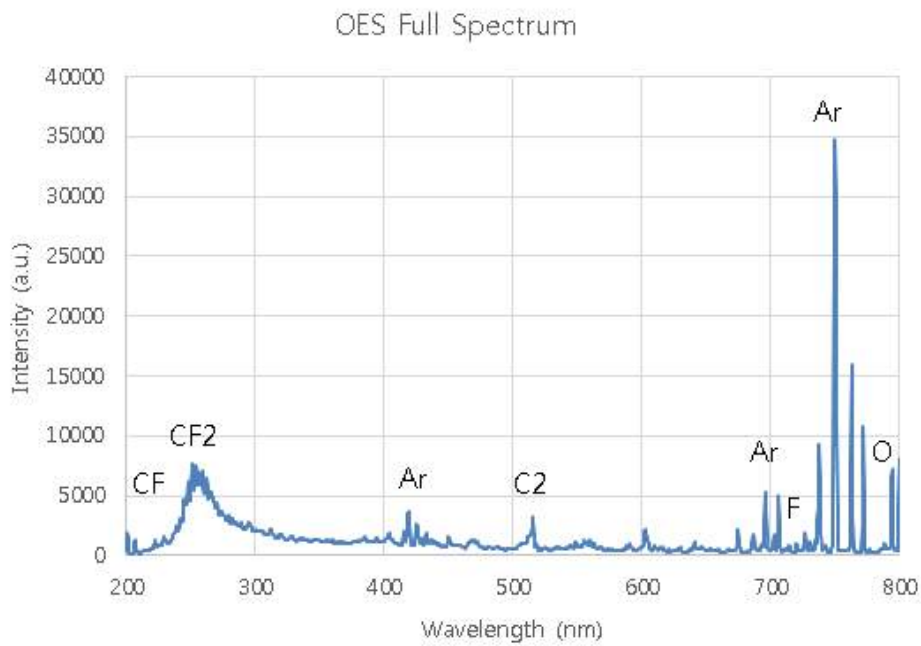


그림 4.2. 장치 운전 중 OES로 얻은 Full Spectrum

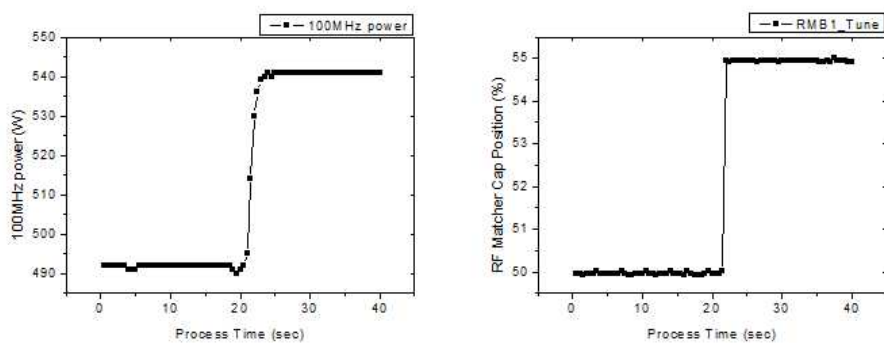


그림 4.3. Step Function 형태로 반응하는 FDC 센서의 예 - 100MHz power와 Matcher의 cap position

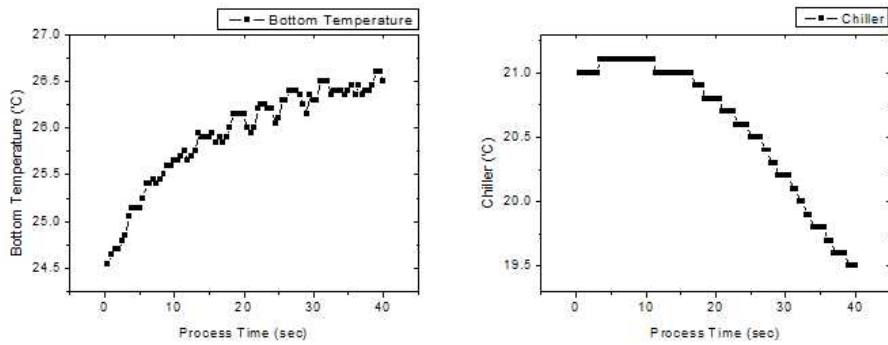


그림 4.4. Step Function 형태로 반응하지 않고 연속적인 변화 곡선을 보이는 FDC 센서의 예 - Bottom Temperature와 Chiller

| OES 센서 | | | | | |
|---------------|--------|---------------|--------|---------------|----------|
| 750nm | OES-01 | 456.5nm/750nm | OES-20 | 667nm/750nm | OES-39 |
| 201nm/750nm | OES-02 | 467.5nm/750nm | OES-21 | 690nm/750nm | OES-40 |
| 207nm/750nm | OES-03 | 469nm/750nm | OES-22 | 696nm/750nm | OES-41 |
| 213nm/750nm | OES-04 | 471nm/750nm | OES-23 | 703nm/750nm | OES-42 |
| 251.5nm/750nm | OES-05 | 473nm/750nm | OES-24 | 706.5nm/750nm | OES-43 |
| 254.5nm/750nm | OES-06 | 476nm/750nm | OES-25 | 712.5nm/750nm | OES-44 |
| 259nm/750nm | OES-07 | 480nm/750nm | OES-26 | 714nm/750nm | OES-45 |
| 385nm/750nm | OES-08 | 482.5nm/750nm | OES-27 | 727nm/750nm | OES-46 |
| 387nm/750nm | OES-09 | 487.5nm/750nm | OES-28 | 738nm/750nm | OES-47 |
| 394.5nm/750nm | OES-10 | 496nm/750nm | OES-29 | 754.5nm/750nm | OES-48 |
| 396.5nm/750nm | OES-11 | 499.5nm/750nm | OES-30 | 757nm/750nm | OES-49 |
| 402nm/750nm | OES-12 | 512nm/750nm | OES-31 | 763nm/750nm | OES-50 |
| 406.5nm/750nm | OES-13 | 515.5nm/750nm | OES-32 | 772nm/750nm | OES-51 |
| 415.5nm/750nm | OES-14 | 535nm/750nm | OES-33 | 775nm/750nm | OES-52 |
| 419.5nm/750nm | OES-15 | 553nm/750nm | OES-34 | 777nm/750nm | OES-53 |
| 425.5nm/750nm | OES-16 | 558nm/750nm | OES-35 | 794.5nm/750nm | OES-54 |
| 428.5nm/750nm | OES-17 | 563nm/750nm | OES-36 | 800nm/750nm | OES-55 |
| 433nm/750nm | OES-18 | 603nm/750nm | OES-37 | EEDF 모양 인자 | b-factor |
| 450.5nm/750nm | OES-19 | 641nm/750nm | OES-38 | | |

표 4.1. 선정된 56개의 OES 센서

| FDC 센서 | | | | | |
|------------------|--------|-----------------|--------|------------|--------|
| 1000mT_Gauge | FDC-01 | RFB2_DC_BiasVpp | FDC-09 | HTR2_Temp. | FDC-17 |
| Top_Temp | FDC-02 | RMS1_LoadP | FDC-10 | Ar_Flow | FDC-18 |
| Bottom_Temp | FDC-03 | RMS1_TuneP | FDC-11 | C4F8_Flow | FDC-19 |
| RFS1_FwdPwr | FDC-04 | RMB1_LoadP | FDC-12 | O2_Flow | FDC-20 |
| RFB13_FwdPwr | FDC-05 | RMB1_TuneP | FDC-13 | CHL1_Temp. | FDC-21 |
| RFB2_FwdPwr | FDC-06 | RMB2_LoadP | FDC-14 | CHL2_Temp. | FDC-22 |
| RFS1_DC_BiasVpp | FDC-07 | RMB2_TuneP | FDC-15 | eTVP_Press | FDC-23 |
| RFB13_DC_BiasVpp | FDC-08 | HTR_Temp. | FDC-16 | eTVP_Posit | FDC-24 |

표 4.2. 선정된 24개의 FDC 센서

4.3 EEDF 모양 인자

본 연구에서는 플라스마의 해석 기반의 공정 플라스마 모니터링 기법을 개발하기 위하여 플라스마 인자를 모니터링 인자로 추가하여 사용하였다. 그 플라스마 인자는 OES를 이용하여 측정한 Electron Energy Distribution Function(EEDF) 모양인자로서 EEDF의 형태를 나타내는 인자이다. EEDF는 일반적으로 분포 함수의 모양에 의하여 Maxwellian, bi-Maxwellian 그리고 Druyvesteyn 형태로 분류된다. bi-Maxwellian EEDF는 플라스마가 저온과 고온의 두가지 온도를 가지고 있는 것으로 간주된다. 그러므로 EEDF형태의 꼬리 부분이 살아있는 형태가 된다. Druyvesteyn EEDF는 고에너지군의 꼬리 부분이 죽어있는 형태이므로 고에너지 전자군이 플라스마내에 거의 존재하지 않는다고 할 수 있다. 이러한 형태들은 EEDF 모양인자의 정의를 이용하여 일반화 할 수 있다.

$$f(\epsilon) = c_1 \epsilon^{1/2} \exp(-c_2 \epsilon^x) \quad (4.1)$$

여기에서 ϵ 는 전자 에너지, x 는 EEDF의 모양인자를 말한다. x 의 값은 1과 2 사이의 값을 갖게 되는데 이 값이 커지면 EEDF의 꼬리 부분이 죽게되는 Druyvesteyn 형태로 변하게 되고 이 값이 작아지게 되면 EEDF 꼬리 부분이 발달하는 Maxwellian 형태로 변하게 된다.

모양 인자의 측정은 Ar metastable과 Ar ion 방출선의 비율을 이용한다. Ar metastable line은 상대적으로 저에너지군을 대변하고 Ar ion line은 상대적으로 고에너지군을 대변한다. 따라서 이 인자를 이용하면 EEDF 꼬리 부분에서 나타내는 고에너지 전자군의 비율을 모니터링 할 수 있다.[11]

본 실험에서는 Ar의 방출 빛 중 425.5nm와 763nm 파장의 빛을 이

용하여 EEDF 모양인자를 계산하였고 이를 b-factor라 정의한다. 425.5nm 파장은 threshold energy가 14.73eV이므로 상대적으로 고에너지 전자군을 대변하게 되고 763nm 파장은 threshold energy가 13.17eV이므로 상대적으로 저에너지 전자군을 대변하게 된다.

4.4 주파수 전력 인자와 공정 플라즈마 모니터링 인자와의 상관관계

이번 장에서는 앞서 설명한 센서 민감도 랭킹 실험을 통한 플라즈마 모니터링 인자들의 민감도 랭킹에 대한 결과를 기술 하고자 한다. 각 실험은 저전력, 저밀도 기준 조건과 고전력, 고밀도 기준 조건에서 동일하게 진행되었다.

평가 방법은 각 전력 인자를 기준 조건에서 10%씩 변동을 주었을 때 기준조건에서 나타내는 센서 값과 변동 후의 센서 값을 비교하여 식 4.2와 같이 변동률을 계산하여 그 절대값이 큰 순으로 센서의 랭킹을 부여한다.

$$\text{센서 변동률} = \frac{10\% \text{변동 후 센서값} - \text{기준 조건 센서 값}}{\text{기준 조건 센서 값}} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

100MHz 전력을 기준 조건에서 10% 변동을 주었을 때 센서의 민감도 랭킹 결과는 부록의 표 A.1과 같다. OES 센서의 경우 각 기준 조건에서 민감하게 반응하는 센서의 종류와 반응 정도에 차이가 크게 나타났다. 예를 들어 OES-02의 경우 저전력, 저밀도 기준 조건에서는 민감도 랭킹이 1위로 가장 높게 나타난 반면 고전력, 고밀도 기준 조건에서는 54위로 매우 낮게 나왔다. FDC 센서의 경우에는 그와 달리 각 기준 조건에서 센서의 민감도가 비슷한 경향을 나타내어 운전 조건의 변화에 따른 변별력이 떨어지는 결과나 나왔다.

마찬가지로 13.56MHz 전력에 대한 센서의 민감도 결과는 부록의 표 A.2에 나타내었다. 이 결과도 100MHz의 결과와 마찬가지로 각 기준 조건별로 민감한 센서의 종류와 반응 정도에서 큰 차이를 보였다. 예를 들어 OES-01의 경우 저전력, 저밀도 기준 조건에서는 민감도 랭킹이 3위로 높게 나타나지만 고전력, 고밀도 기준 조건에서는 53위로 낮게

나타난다. FDC 센서의 경우 앞선 100MHz의 결과와 마찬가지로 각 조건에서 센서의 민감도가 비슷한 경향을 나타내었다.

마지막으로 2MHz 전력에 대한 센서의 민감도 결과는 부록의 표 A.3에 나타내었다. 2MHz의 결과에서도 마찬가지로 각 기준 조건에 따라 센서의 민감도 랭킹의 차이가 나타났지만 앞선 100MHz, 13.56MHz의 경우 보다는 그 차이가 크지는 않았다. 예를 들어 OES-03의 경우 저전력, 저밀도 기준 조건에서의 랭킹은 8위로 나타났고 고전력, 고밀도 기준 조건에서는 1위로 나타났다. 또 다른 예로 OES-40의 경우 저전력, 저밀도 기준 조건에서는 2위로 나타났고 고전력, 고밀도 기준 조건에서는 4위로 나타났다. FDC 센서의 경우 이번 결과에서도 마찬가지로 각 조건에서 센서의 민감도가 비슷한 경향으로 나타났다.

이 결과로부터 알 수 있는 사실은 모니터링 하고자 하는 플라즈마의 상태에 따라서 OES 센서의 경우 반응 경향과 민감도의 차이가 다르게 나타나게 된다는 것이다. 그리고 FDC 센서의 경우 플라즈마 상태에 상관 없이 센서의 반응이 비슷하게 나타난다는 것이다. 따라서 모니터링 인자의 결정은 플라즈마의 상태에 따라 다르게 선택해야 하며 10% 전력 변동과 같은 크지 않은 운전 조건 변동에 대해서는 FDC 센서의 경우 OES 센서보다 플라즈마 상태에 따른 변별력이 떨어질 수 있음을 알 수 있었다.

4.5 플라즈마 진단 인자와 식각 공정 결과와의 상관관계

본 장에는 센서 민감도 랭킹 실험의 방법으로 선택한 모니터링 인자와 식각 공정 결과의 상관관계를 분석하였다. 식각 실험은 앞서 설명한 MC 공정 시료를 저전력, 저밀도 기준 조건으로 총 50개의 시편을 식각하고 식각 공정 중 취득한 센서값과 식각 후 V-SEM을 이용한 식각 시료 분석 결과를 비교하였다. 상관관계 분석은 각 기준 조건에서 민감한 OES 센서와 FDC 센서를 민감도가 높은 순서로 상위16개를 채택하였고, 그 채택된 센서 값들과 식각 결과간의 1차원 다중 회귀분석을 수행하였다.

회귀분석이란 독립변수와 종속변수 간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고 이 모형을 측정된 데이터로부터 추정하는 통계적 분석 방법을 의미한다. 본 실험에서 독립변수는 플라즈마 진단 인자가, 종속변수란 식각 공정 결과가 해당된다. 특히 본 연구에 활용된 1차원 다중 회귀분석이란 독립변수와 종속변수 간에 선형적인 관계를 설정하여 분석하며 독립변수가 2개 이상일 경우를 의미한다. 이 결과에서 R^2 를 결정 계수라 하고 이는 0과 1 사이의 값을 갖는다. R^2 값이 높을수록 회귀분석 모델에 의하여 결과 해석이 용이함을 의미한다. 즉 R^2 가 0.7이라면 추정된 회귀 모형식에 의하여 관측값을 70% 정도 설명할 수 있다는 의미가 된다.

그림 4.5는 상관 관계 분석을 통해 얻은 예측 식각률과 실측 식각률의 상관도이다. 분석결과 식각을 진행한 플라즈마 조건인 저전압, 저밀도 기준 조건에서 민감한 OES 모니터링 인자가 활용된 예측 식각률은 93.8%의 높은 상관도를 얻을 수 있었다. 즉 R^2 가 0.938로 매우 높은 값을 보였다. 해당 플라즈마 발생 조건과 다른 고전압, 고밀도 기준 조건에서 민감한 OES 모니터링 인자는 79.3%의 상관도를 나타내었다. 이는 corona equilibrium 모델을 기반으로 한 b-factor의 특성상 저압 조건에서 보다 측정의 정확도를 갖기 때문인 것으로 사료된다.[11] FDC 센서는 51.0%로 실측 식각률과 다소 낮은 상관도를 보였다.

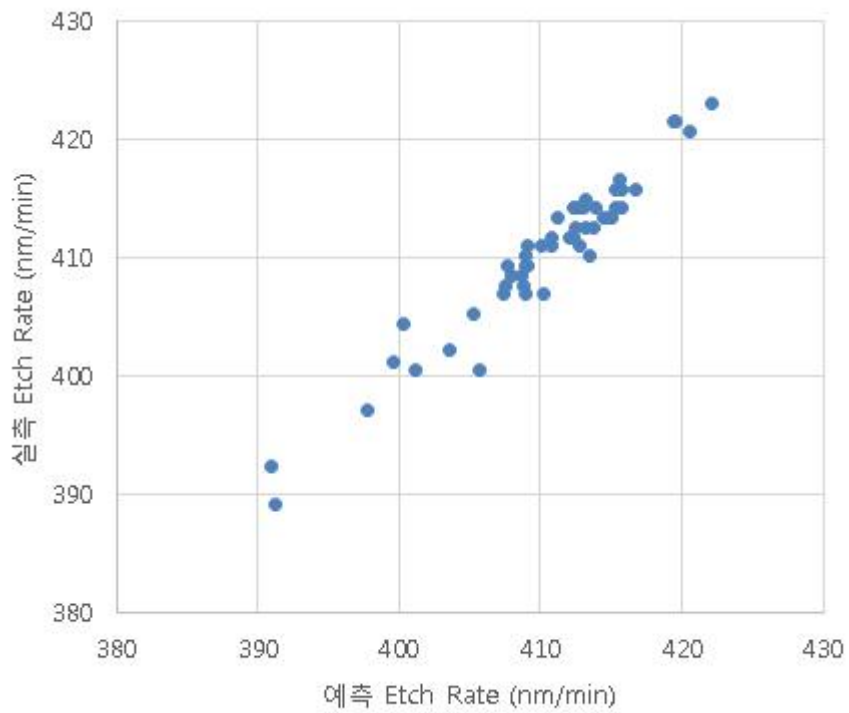


그림 4.5. 저전력, 저밀도 기준 조건에 민감하게 반응한 OES 센서와 식각률의 상관관계 $R^2=93.8\%$

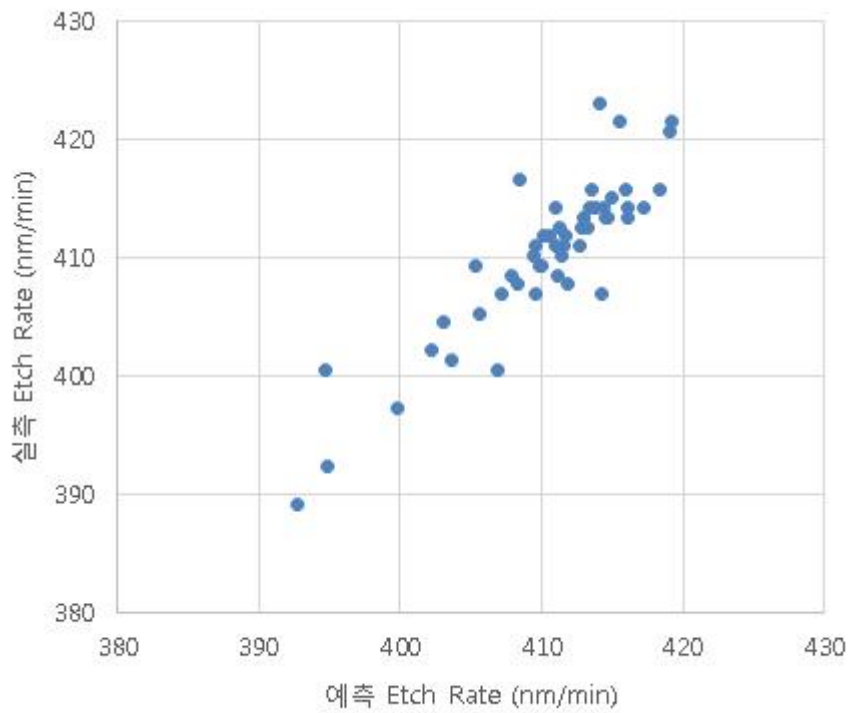


그림 4.6. 고전력, 고밀도 기준 조건에 민감하게 반응한 OES 센서와
식각률의 상관관계 $R^2=79.3\%$

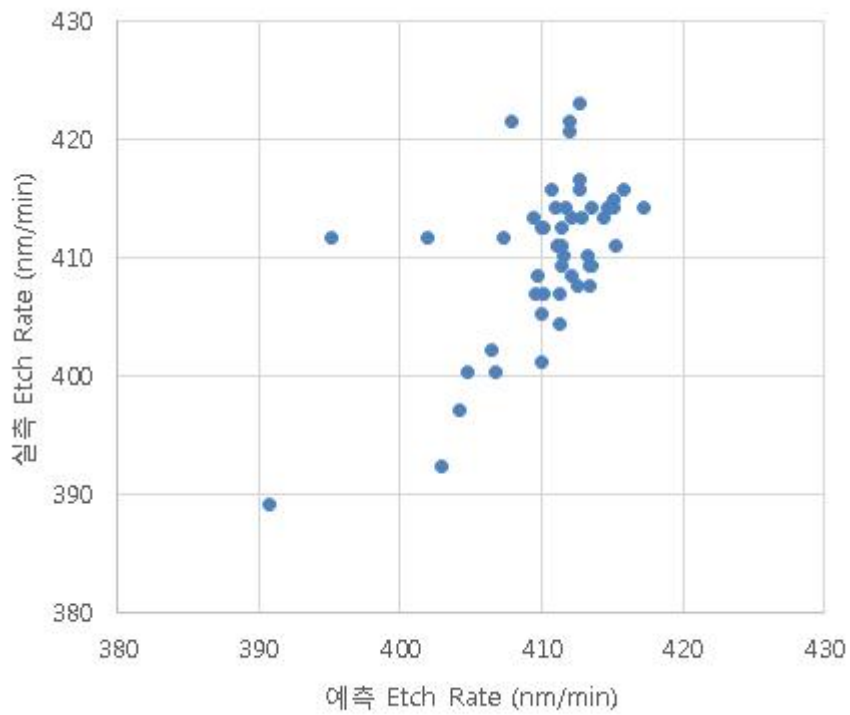


그림 4.7. FDC 센서와 식각률의 상관관계 $R^2=51.0\%$

제5장. SiO₂의 13.56MHz Bias Power에 의한 공정 제어

본 장에서는 모니터링 인자와 식각 공정 간의 상관관계 분석을 바탕으로 장치 주파수 전력인자와 식각 공정 간의 상관관계를 이용한 공정 제어 방법에 대하여 논의 하였다.

5.1 식각률 가상 예측 모델

4.5장에서 기술한 모니터링 인자와 식각 공정 결과와의 상관관계를 이용하여 1차원 다중 회귀분석으로 계산한 식각률 가상 예측 모델은 식 5.1과 같다. 이때 추정된 회귀 모델에 대한 p-value의 값은 $1.94E-74$ 로 본 예측 모델이 통계적으로도 유의함을 알 수 있다. 이 식각률 가상 예측 모델의 실측 식각률에 대한 상관도는 93.8%이며 실측 식각률과 예측 식각률을 함께 나타낸 그림 5.1에서 볼 수 있는 것과 같이 실측 식각률과 예측 식각률의 오차는 0.19%로, 일반적으로 현장의 예측 오차 요구 수준인 0.4% 수준을 만족하는 상당히 정확한 예측 모델이라고 할 수 있다. 식 5.1의 각 항을 구성하는 계수들의 값을 확인해 보면 본 연구에서 플라즈마의 특성 반영을 위해 활용한 EEDF 모양 인자인 b-factor의 계수가 가장 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉 b-factor의 값은 식각률에 매우 큰 상관도를 가지고 있음을 알 수 있다. b-factor는 앞서 4.3장에서 설명한 바와 같이 EEDF의 꼬리 부분의 비율을 대표하는 값으로, 식각 공정에 기여하는 주요 라디컬 및 이온종의 생성률에 민감한 인자이다. 이 인자 한 가지만을 사용한 경우에도 74.8%의 높은 상관도를 나타내어 플라즈마의 반응률을 지배하는 특성 인자가 플라즈마 공정 진단 모델에 반드시 활용 되어야 함을 보여준다.

$$\begin{aligned}
 \text{Etch Rate} = & 6341.291 \times \text{b-factor} - 1925.57 \times \text{OES50} \\
 & - 4222.48 \times \text{OES27} - 2561.59 \times \text{OES47} \\
 & + 2412.469 \times \text{OES33} \dots
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

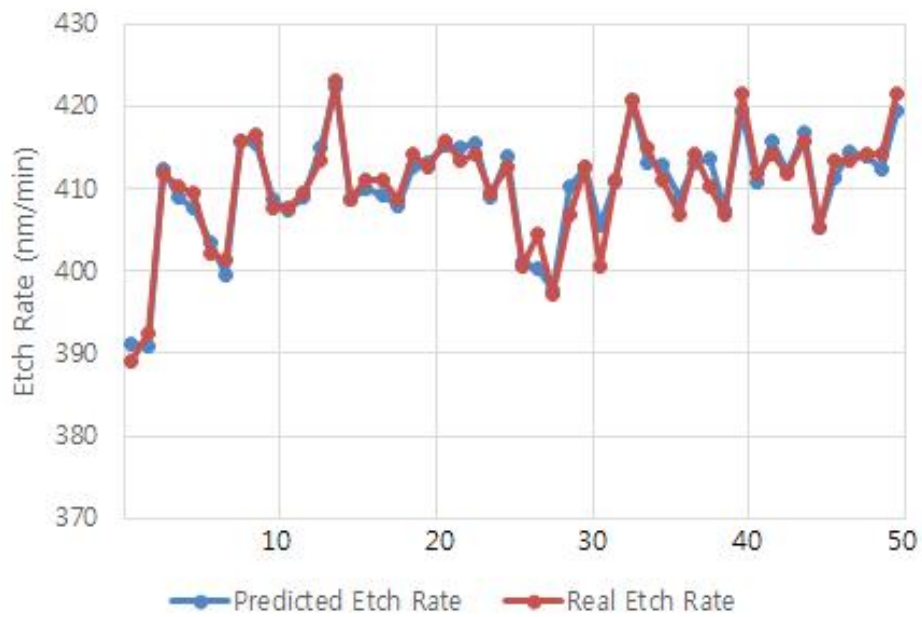


그림 5.1. 식각률 가상 예측 모델에 의한 예측 식각률과 실측 식각률

5.2 주파수 전력 인자와 식각 공정 가상계측 모델과의 상관관계

이번 장에서는 주파수 전력 인자와 식각 공정 결과와의 상관관계 분석을 통하여 식각률 가상 계측 모델에서 주파수 전력 인자가 모니터링 인자에 어떠한 영향을 주고 그 결과 식각률에 어떤 변화를 가지고 오는지에 대한 분석 결과를 논의하였다. 이와같은 분석이 선행 되어야 주파수 전력 인자를 이용한 공정 제어가 가능하기 때문이다. 식각률 가상 계측 모델에서 계수가 큰 모니터링 인자들이 주파수 전력 인자의 변동에 어떻게 반응하는지 분석하였다. 즉 기준 조건 대비 10%인 100MHz 30W, 13.56MHz 100W, 2MHz 300W를 각각 변동을 주었을 때 각각의 플라즈마 진단 인자들이 변동값을 분석하였다.

식 5.1에서의 계수가 가장 큰 b-factor의 경우 식5.2와 같이 100MHz에 의한 영향을 가장 크게 받는다. 그 다음으로는 13.56MHz의 영향을 크게 받고 2MHz에 의한 영향은 그 계수의 값이 10^{-2} 만큼 작기 때문에 영향을 매우 적게 받는다.

$$\Delta b-factor = 1.9 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta 100MHz}{30W} - 1.1 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100W} - 3.3 \times 10^{-5} \times \frac{\Delta 2MHz}{300W} \quad (5.2)$$

b-factor 다음으로 식각률 가상 계측 모델에 영향을 크게 주는 모니터링 인자는 OES-50 센서로 식5.3과 같이 100MHz에 의한 영향을 가장 크게 받는다. 그 다음으로는 2MHz에 의한 영향이 크고 13.56MHz에 의한 영향이 가장 작게 나타난다.

$$\begin{aligned}\Delta OES-50 = & -5.35 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta 100MHz}{30W} - 3.8 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100W} \\ & + 4.1 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta 2MHz}{300W}\end{aligned}\quad (5.3)$$

OES-27의 경우 식5.4와 같이 100MHz에 의한 영향이 가장 크며 2MHz와 13.56MHz 순으로 영향을 받지만 100MHz에 의한 영향보다 10^{-1} 만큼 그 크기가 작기 때문에 100MHz에 의한 영향이 가장 크다고 할 수 있겠다.

$$\begin{aligned}\Delta OES-27 = & 1.87 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 100MHz}{30W} + 7.27 \times 10^{-5} \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100W} \\ & + 7.94 \times 10^{-5} \times \frac{\Delta 2MHz}{300W}\end{aligned}\quad (5.4)$$

OES-47는 식5.5처럼 2MHz에 의한 영향이 가장 크고 다음은 100MHz에 의한 영향이 크다. 이에 비해 13.56MHz는 10^{-1} 만큼 작게 영향을 주는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned}\Delta OES-47 = & -4.0 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 100MHz}{30W} + 9.7 \times 10^{-5} \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100W} \\ & + 9.32 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 2MHz}{300W}\end{aligned}\quad (5.5)$$

OES-33 센서는 식5.6에서 보이듯 100MHz가 가장 큰 영향을 주고 2MHz, 13.56MHz 순으로 영향을 받는다.

$$\begin{aligned}\Delta OES-33 = & 2.76 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 100MHz}{30W} + 9.85 \times 10^{-5} \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100W} \\ & + 1.02 \times 10^{-4} \times \frac{\Delta 2MHz}{300W}\end{aligned}\quad (5.6)$$

식 5.2 ~ 5.6의 결과를 종합하면 해당 OES 센서값들은 100MHz에 의한 영향을 가장 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 즉 식각률을 결정하는데 있어 100MHz에 의한 역할이 크다고 판단할 수 있다. 이 결과는 1차적으로 식각반응에 있어 플라즈마 밀도의 역할이 가장 크다는 것을 시사한다. 식각률은 기판에 입사하는 ion flux와 ion energy에 비례한다고 알려져 있는데, 이중 플라즈마 밀도는 ion flux를 지배하는 인자이고 3.2장에서 기술한 바와 같이 stochastic heating에 의한 plasma heating은 주파수의 제곱에 비례하므로 초고주파인 100MHz의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 한편, 중간 주파수인 13.56MHz는 식각률 가상 예측 모델에 영향을 가장 크게 주는 인자인 b-factor의 변동을 일으키는 효과를 크게 나타낸다. 따라서 13.56MHz는 100MHz와 비교할 때 플라즈마 밀도와 ion energy, 식각률의 전반적인 양을 결정하는 인자는 아니지만, 기준 운전 범위 내에서 미세한 크기의 공정 결과 및 플라즈마 상태(b-factor)를 제어하는 데에 유의미한 인자임을 알 수 있다.

5.3 주파수 전력 인자를 이용한 공정 제어

지금까지 논의한 모니터링 인자를 이용한 식각률 가상 예측 모델 구성과 식각률 모델에 큰 영향을 주는 인자들의 전력 인자 변동에 대한 반응 특성을 기반으로 본 장에서는 식각률 가상 예측 모델을 통하여 예측한 식각률을 미세 제어하는 방법에 대하여 논하였다. APC의 궁극적인 목표는 공정의 결과를 미리 예측하여 기준점에서 벗어나는 공정 결과가 예측될 경우 공정 제어를 통하여 기준점에 만족하는 공정 결과로 제어하는 것이다. 본 연구에서도 이와 같은 목표로 연구를 수행하였고 그 가능성을 확인하였다.

각 주파수 전력인자의 10%의 변동이 있을 때의 식각률의 변동치를 분석해 보면 식 5.7과 같다. 여기에서 10%의 의미는 미세 제어를 뜻한다. 그 이유는 전원 장치의 기계적인 한계로 10% 이하의 미세한 값에 대하여는 정확한 값을 보증할 수 없는 문제점이 있기 때문에 실제의 제어를 목표로 하여 10% 기준의 제어 모델을 수립하였다.

$$\Delta Etch Rate = 4.9 \times \frac{\Delta 100MHz}{30 W} + 11.9 \times \frac{\Delta 13.56MHz}{100 W} + 19.9 \times \frac{\Delta 2MHz}{300 W} \quad (5.7)$$

각 항의 계수는 각 전력인자를 기준 조건에서 10%를 변동시키는 기준으로 식각률이 얼마나 변하는가를 나타낸 것이다. 즉 100MHz의 10%인 30W, 13.56MHz의 10%인 100W, 2MHz 10%인 300W 변동 기준으로 식각률 변화를 분석한 것이다. 이 식각률 변동은 기준 조건에서의 미세 변동을 나타내는 것으로 모든 공정 조건에서 성립하는 값이 아님을 분명히 한다. 이 식에서 알 수 있는 것은 각 전력인자를 10% 변동시켰을 경우 2MHz 10% 변동에 의한 Etch Rate 변화가 19.9nm/min로 가장 크고 13.56MHz 10% 변동에 의한 Etch Rate 변화가 11.9nm/min, 100MHz 10% 변동에 의한 Etch Rate 변화가

4.9nm/min으로 측정 되었음을 뜻한다. 이와 같은 제어 모델을 기반으로 하여, 기준점에서 벗어난 공정 결과에 대하여 제어 가능 여부를 평가해 보았다. 그 결과는 그림 5.2에 나타낸 바와 같다.

그림 5.2는 식각률 가상 계측 모델로 예측한 식각률의 값이 기준 값에서 벗어났을 경우 위의 식 5.7을 이용하여 미세 식각률 제어를 13.56MHz power를 이용하여 시도한 결과를 보여준다. 13.56MHz power를 10% 상향 할 경우 기준점에 만족한 식각 결과를 얻을 수 있고 2MHz power를 10% 상향 할 경우 기준점 이상으로 벗어나는 결과를 얻게 된다. 따라서 본 연구에서 목표로 하는 미세한 식각률의 제어에는 2MHz보다 13.56MHz를 이용한 식각 제어가 합리적임을 확인할 수 있다. 즉, 플라즈마 특성 인자 활용을 기반으로 한 공정 제어 모델을 통해 TF-CCP 식각 장치의 식각률 제어에 효율적인 제어 인자를 도출하고 결론적으로 실제 제어의 가능성을 보일 수 있었다.

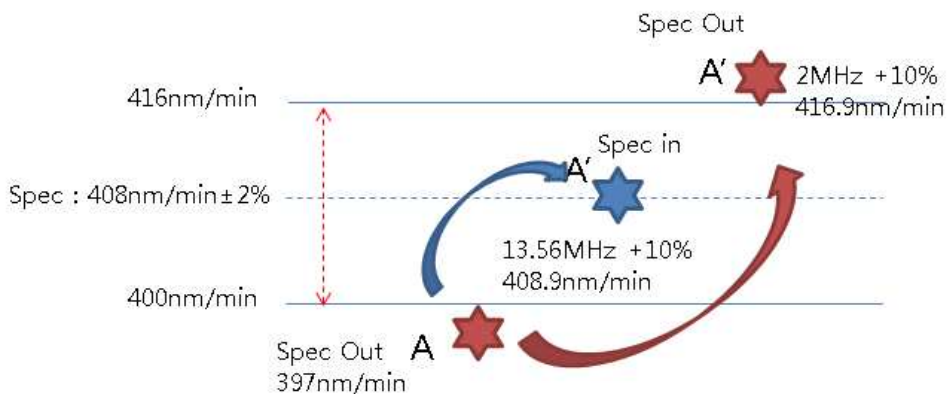


그림 5.2. 기준점에서 벗어난 공정 결과를 전력 인자를 이용한 미세 제어를 통해 기준점에 만족하는 공정 결과를 얻을 수 있음

제6장. 결론

Capacitively Coupled Plasma 장치의 전력 인자 중 초고주파인 100MHz는 플라즈마 밀도에 큰 영향을 주며 저주파인 2MHz는 ion energy에 큰 영향을 준다는 것을 알게 되었다. 하지만 100MHz 초고주파의 특성인 standing wave effect로 플라즈마 밀도의 nonuniformity의 악화 현상이 발생되며 이를 보완하기 위한 중간 주파수인 13.56MHz를 적용한 Triple Frequency CCP가 개발 되었으며 이때의 중간 주파수는 플라즈마 밀도와 ion energy 두가지 모두를 제어할 수 있다는 것을 밝혔다.

그리고 장치의 주 공정 영역인 저전력, 저밀도 플라즈마 공정 조건에서 고전력, 고밀도 플라즈마 공정 조건으로 넘어가는 영역에서 플라즈마 밀도에 의한 공정의 비선형성이 발견되었고 이를 회로 모델을 바탕으로 초고주파 narrow gap 장치 특성인 Plasma Series Resonance에 의한 비선형적인 플라즈마 특성임을 밝혔다. 또한 이때 13.56MHz에 의하여 PSR 발생이 촉진되는 것을 알게 되었다. 따라서 13.56MHz의 공정에 대한 역할의 이해가 매우 중요하다는 것을 알게 되었다.

이를 기반으로 전력 인자에 따른 모니터링 인자를 도출하였고 그 인자와 공정 결과 사이에 높은 상관관계가 있음을 밝히고 플라즈마 해석을 통하여 개발된 플라즈마 모니터링 방법론인 EEDF 모양인자를 이용하여 얻은 식각률 가상 계측 모델의 높은 정확도로 증명하였다. 즉 플라즈마 모니터링 기법을 포함한 공정 모니터링의 정확도는 93.8%인 반면 플라즈마 모니터링 기법을 제외한 기존의 설비 센서를 이용한 방식에서는 51.0%로 플라즈마 모니터링 기법을 이용한 공정 모니터링의 정확도가 약 2배 높음을 알 수 있었다.

또한 전력 인자와 식각 공정 결과간의 상관 관계를 도출하고 식각률 가상 계측 모델을 이용하여 예측된 공정 결과를 제어할 수 있음을 보였

다. 이때 미세 식각 제어를 위해서는 13.56MHz 전력을 이용한 제어가 가장 적절함을 보였다.

이는 기존의 통계적 방법만을 이용한 공정 진단과 가상 계측 방법론의 경우 단순 통계 결과를 차용함으로써 PSR 같은 플라즈마의 변동의 원인 분석이 불가하였으나 본 플라즈마 모니터링 기반의 방법에서는 플라즈마 특성 변동을 추적하여 그 정확도를 약 2배 높이고 이로 인하여 제어 인자의 결정 과정이 보다 명확해짐을 알 수 있었다.

지금까지 일련의 Triple Frequency CCP장치를 이용한 플라즈마 식각 공정 제어를 위한 플라즈마 진단 방법론 개발 과정을 통하여 앞으로 공정을 스스로 관리하고 제어할 수 있는 Smart Equipment 개발을 위한 혹은 더 발전된 APC나 Feedback control의 개념을 만들어 나가는 데 있어 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 홍형선, 반도체 소자 특강, DRAM Device Technology, p36 Sep 2012

- [2] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken (2005)

- [3] F T Cheng et al., Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 9 (2012) 1.

- [4] V.N.Volynets et al., Experimental study of spatial nonuniformities in 100MHz capacitively coupled plasma using optical probe, J. Bac. Sci. Technol. A 26(3), (2008)

- [5] W. Schwarzenbach, A. A. Howling, M. Fivaz, S. Brunner, and Ch. Hollenstein, Sheath impedance effects in very high frequency plasma experiments, J. Vac. Sci. Technol. A 14, 132 (1996)

- [6] Ying Zhang, Gottlieb S. Oehrlein, and Ferdinand H. Bell, Fluorocarbon high density plasmas. VII. Investigation of selective SiO₂ to Si₃N₄ high density plasma etch processes, J. Vac. Sci. Technol. A 14, 2127 (1996)

- [7] A. Perret, P. Chabert, J.-P. Booth, J. Jolly, J. Guillon, and Ph. Auvray, Ion flux nonuniformities in large-area high-frequency capacitive discharges, *Appl. Phys. Lett.* 83, 243 (2003)
- [8] S-H Lee, M-S Choi, Y-C Jang, S Jeong, S Ryu, N-K Kim, H-J Roh and Gon-Ho Kim, Effect of Plasma Series Resonance on Standing Wave in Pulsed VHF Driven Narrow Gap Capacitively Coupled Plasma, *ICMAP 2014*
- [9] S. Shannon, D. Hoffman, J.G. Yang, A. Paterson, and J. Holland, The impact of frequency mixing on sheath properties: Ion energy distribution and Vdc/Vrf interaction, *J. Appl. Phys.* 97, 103304 (2005)
- [10] KH Baek, K Song, C Han, G Choi, HK Cho et al., Implementation of a robust virtual metrology for plasma etching through effective variable selection and recursive update technology, *J. Vac. Sci. Technol. B* 32(1), Jan/Feb (2014)
- [11] S.Park, J.-M. Choe, H.-J.Rho, and G.-H.Kim, Characteristics of a Non-Maxwellian Electron Energy Distribution in a Low-pressure Argon Plasma, *JKPS* vol. 64, No. 12, June (2014)

부록

A. 센서 민감도 랭킹 실험 결과

100MHz, 13.56MHz, 2MHz 각각의 전력 인자를 기준 조건에서 10%씩 변동을 주었을 때 센서값의 변동의 민감도가 높은 순으로 랭킹화 하였다.

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | OES-02 | OES-07 | 29 | OES-50 | OES-45 |
| 2 | OES-01 | OES-06 | 30 | OES-49 | OES-42 |
| 3 | OES-07 | OES-09 | 31 | OES-26 | OES-14 |
| 4 | OES-06 | OES-11 | 32 | OES-48 | OES-18 |
| 5 | OES-53 | OES-05 | 33 | OES-17 | OES-19 |
| 6 | OES-05 | OES-31 | 34 | OES-14 | OES-46 |
| 7 | OES-09 | OES-08 | 35 | OES-39 | OES-16 |
| 8 | OES-11 | OES-12 | 36 | OES-19 | OES-44 |
| 9 | OES-12 | OES-32 | 37 | OES-54 | OES-15 |
| 10 | OES-31 | OES-21 | 38 | OES-42 | OES-55 |
| 11 | OES-08 | OES-33 | 39 | OES-18 | OES-29 |
| 12 | OES-21 | OES-22 | 40 | OES-51 | OES-40 |
| 13 | OES-33 | OES-10 | 41 | OES-29 | OES-26 |
| 14 | OES-32 | OES-23 | 42 | OES-38 | OES-43 |
| 15 | OES-10 | OES-36 | 43 | OES-40 | OES-41 |
| 16 | OES-22 | OES-34 | 44 | OES-24 | OES-47 |
| 17 | OES-30 | OES-13 | 45 | OES-45 | OES-37 |
| 18 | OES-23 | OES-35 | 46 | OES-46 | OES-54 |
| 19 | OES-13 | OES-30 | 47 | OES-04 | OES-51 |
| 20 | OES-34 | OES-20 | 48 | OES-16 | OES-25 |
| 21 | OES-36 | OES-27 | 49 | OES-37 | OES-50 |

| | | | | | |
|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 22 | OES-03 | OES-04 | 50 | OES-55 | OES-28 |
| 23 | OES-27 | OES-49 | 51 | OES-15 | OES-52 |
| 24 | OES-20 | OES-24 | 52 | OES-41 | OES-03 |
| 25 | OES-28 | OES-17 | 53 | OES-44 | OES-01 |
| 26 | OES-35 | OES-39 | 54 | OES-47 | OES-02 |
| 27 | OES-52 | OES-48 | 55 | OES-43 | OES-53 |
| 28 | OES-25 | OES-38 | | | |

표 A.1.1 100MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | FDC-04 | FDC-07 | 13 | FDC-02 | FDC-17 |
| 2 | FDC-07 | FDC-04 | 14 | FDC-16 | FDC-01 |
| 3 | FDC-22 | FDC-03 | 15 | FDC-17 | FDC-21 |
| 4 | FDC-08 | FDC-22 | 16 | FDC-19 | FDC-18 |
| 5 | FDC-09 | FDC-08 | 17 | FDC-12 | FDC-05 |
| 6 | FDC-14 | FDC-09 | 18 | FDC-18 | FDC-19 |
| 7 | FDC-03 | FDC-13 | 19 | FDC-05 | FDC-20 |
| 8 | FDC-13 | FDC-14 | 20 | FDC-01 | FDC-16 |
| 9 | FDC-15 | FDC-15 | 21 | FDC-11 | FDC-10 |
| 10 | FDC-24 | FDC-24 | 22 | FDC-06 | FDC-06 |
| 11 | FDC-20 | FDC-02 | 23 | FDC-10 | FDC-11 |
| 12 | FDC-23 | FDC-23 | 24 | FDC-21 | FDC-12 |

표 A.1.2 100MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | OES-02 | OES-31 | 29 | OES-34 | OES-48 |
| 2 | OES-03 | OES-23 | 30 | OES-26 | OES-17 |
| 3 | OES-01 | OES-40 | 31 | OES-17 | OES-33 |
| 4 | OES-31 | OES-52 | 32 | OES-27 | OES-05 |
| 5 | OES-20 | OES-24 | 33 | OES-29 | OES-39 |
| 6 | OES-21 | OES-20 | 34 | OES-33 | OES-27 |
| 7 | OES-24 | OES-04 | 35 | OES-30 | OES-53 |
| 8 | OES-35 | OES-08 | 36 | OES-19 | OES-16 |
| 9 | OES-12 | OES-12 | 37 | OES-16 | OES-18 |
| 10 | OES-23 | OES-13 | 38 | OES-48 | OES-45 |
| 11 | OES-40 | OES-25 | 39 | OES-18 | OES-19 |
| 12 | OES-11 | OES-26 | 40 | OES-46 | OES-42 |
| 13 | OES-52 | OES-09 | 41 | OES-42 | OES-14 |
| 14 | OES-22 | OES-22 | 42 | OES-38 | OES-38 |
| 15 | OES-32 | OES-32 | 43 | OES-39 | OES-46 |
| 16 | OES-09 | OES-21 | 44 | OES-41 | OES-15 |
| 17 | OES-49 | OES-28 | 45 | OES-15 | OES-41 |
| 18 | OES-13 | OES-11 | 46 | OES-45 | OES-54 |
| 19 | OES-07 | OES-29 | 47 | OES-14 | OES-51 |
| 20 | OES-25 | OES-34 | 48 | OES-53 | OES-37 |
| 21 | OES-36 | OES-36 | 49 | OES-37 | OES-55 |
| 22 | OES-06 | OES-35 | 50 | OES-51 | OES-43 |
| 23 | OES-28 | OES-44 | 51 | OES-55 | OES-47 |
| 24 | OES-08 | OES-10 | 52 | OES-43 | OES-50 |
| 25 | OES-04 | OES-07 | 53 | OES-54 | OES-01 |
| 26 | OES-44 | OES-30 | 54 | OES-47 | OES-03 |
| 27 | OES-05 | OES-49 | 55 | OES-50 | OES-02 |
| 28 | OES-10 | OES-06 | | | |

표 A.2.1 13.56MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | FDC-05 | FDC-05 | 13 | FDC-16 | FDC-01 |
| 2 | FDC-08 | FDC-08 | 14 | FDC-20 | FDC-16 |
| 3 | FDC-10 | FDC-10 | 15 | FDC-03 | FDC-23 |
| 4 | FDC-07 | FDC-11 | 16 | FDC-19 | FDC-18 |
| 5 | FDC-11 | FDC-07 | 17 | FDC-12 | FDC-12 |
| 6 | FDC-22 | FDC-03 | 18 | FDC-18 | FDC-17 |
| 7 | FDC-09 | FDC-09 | 19 | FDC-04 | FDC-02 |
| 8 | FDC-14 | FDC-22 | 20 | FDC-24 | FDC-19 |
| 9 | FDC-15 | FDC-14 | 21 | FDC-21 | FDC-20 |
| 10 | FDC-02 | FDC-13 | 22 | FDC-06 | FDC-04 |
| 11 | FDC-17 | FDC-15 | 23 | FDC-01 | FDC-21 |
| 12 | FDC-13 | FDC-24 | 24 | FDC-23 | FDC-06 |

표 A.2.2 13.56MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | OES-52 | OES-03 | 29 | OES-18 | OES-09 |
| 2 | OES-40 | OES-52 | 30 | OES-06 | OES-14 |
| 3 | OES-53 | OES-53 | 31 | OES-32 | OES-43 |
| 4 | OES-28 | OES-40 | 32 | OES-08 | OES-05 |
| 5 | OES-25 | OES-28 | 33 | OES-41 | OES-50 |
| 6 | OES-24 | OES-25 | 34 | OES-16 | OES-51 |
| 7 | OES-26 | OES-04 | 35 | OES-50 | OES-55 |
| 8 | OES-03 | OES-26 | 36 | OES-51 | OES-10 |
| 9 | OES-29 | OES-29 | 37 | OES-45 | OES-31 |
| 10 | OES-44 | OES-24 | 38 | OES-38 | OES-54 |
| 11 | OES-49 | OES-44 | 39 | OES-19 | OES-19 |
| 12 | OES-02 | OES-13 | 40 | OES-05 | OES-42 |
| 13 | OES-20 | OES-49 | 41 | OES-46 | OES-01 |
| 14 | OES-48 | OES-20 | 42 | OES-39 | OES-27 |
| 15 | OES-04 | OES-02 | 43 | OES-54 | OES-15 |
| 16 | OES-22 | OES-48 | 44 | OES-27 | OES-32 |
| 17 | OES-31 | OES-18 | 45 | OES-12 | OES-39 |
| 18 | OES-23 | OES-17 | 46 | OES-37 | OES-11 |
| 19 | OES-35 | OES-08 | 47 | OES-47 | OES-30 |
| 20 | OES-21 | OES-06 | 48 | OES-15 | OES-47 |
| 21 | OES-13 | OES-33 | 49 | OES-14 | OES-34 |
| 22 | OES-30 | OES-12 | 50 | OES-43 | OES-38 |
| 23 | OES-34 | OES-23 | 51 | OES-10 | OES-45 |
| 24 | OES-33 | OES-16 | 52 | OES-55 | OES-46 |
| 25 | OES-36 | OES-07 | 53 | OES-09 | OES-35 |
| 26 | OES-17 | OES-21 | 54 | OES-11 | OES-41 |
| 27 | OES-07 | OES-36 | 55 | OES-01 | OES-37 |
| 28 | OES-42 | OES-22 | | | |

표 A.3.1 2MHz 10% 변동에 따른 OES 센서의 민감도 랭킹

| Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 | Ranking | 저전력, 저밀도 기준조건 | 고전력, 고밀도 기준조건 |
|---------|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | FDC-06 | FDC-06 | 13 | FDC-23 | FDC-18 |
| 2 | FDC-09 | FDC-09 | 14 | FDC-19 | FDC-13 |
| 3 | FDC-22 | FDC-22 | 15 | FDC-20 | FDC-16 |
| 4 | FDC-03 | FDC-10 | 16 | FDC-05 | FDC-19 |
| 5 | FDC-08 | FDC-14 | 17 | FDC-24 | FDC-15 |
| 6 | FDC-07 | FDC-08 | 18 | FDC-18 | FDC-12 |
| 7 | FDC-14 | FDC-02 | 19 | FDC-11 | FDC-05 |
| 8 | FDC-21 | FDC-03 | 20 | FDC-15 | FDC-20 |
| 9 | FDC-17 | FDC-17 | 21 | FDC-01 | FDC-21 |
| 10 | FDC-02 | FDC-24 | 22 | FDC-04 | FDC-23 |
| 11 | FDC-16 | FDC-01 | 23 | FDC-12 | FDC-11 |
| 12 | FDC-13 | FDC-07 | 24 | FDC-10 | FDC-04 |

표 A.3.2 2MHz 10% 변동에 따른 FDC 센서의 민감도 랭킹

B. 시각 공정 실험 결과

시료 50개 시각 공정 시 OES를 이용하여 얻은 센서 데이터 중 센서 민감도 랭킹이 높은 상위 15개 센서와 b-factor 그리고 V-SEM 분석을 통해 얻은 시각률 결과를 표A.1에 정리하였다. 이 데이터를 이용하여 1차원 다중 회귀분석을 통해 시각률 가상 예측 모델을 도출 하였다.

| 시료 | OES-01 | OES-02 | OES-04 | OES-07 | OES-08 | OES-10 |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.976832 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0.984112 | 0.997465 | 0.99402 | 0.996752 | 0.993807 | 0.993947 |
| 3 | 0.995877 | 0.987964 | 0.994615 | 0.999261 | 0.989839 | 0.990904 |
| 4 | 0.993418 | 0.988429 | 0.990561 | 0.994957 | 0.985959 | 0.987726 |
| 5 | 0.992096 | 0.975444 | 0.986205 | 0.993587 | 0.982488 | 0.985157 |
| 6 | 1 | 0.984302 | 0.981459 | 0.991229 | 0.981094 | 0.982031 |
| 7 | 0.989354 | 0.983381 | 0.988325 | 0.992011 | 0.981636 | 0.982991 |
| 8 | 0.993166 | 0.977155 | 0.99178 | 0.989908 | 0.98076 | 0.982025 |
| 9 | 0.991243 | 0.989029 | 0.985965 | 0.987423 | 0.978954 | 0.980826 |
| 10 | 0.992763 | 0.977814 | 0.991214 | 0.986257 | 0.974276 | 0.97763 |
| 11 | 0.998496 | 0.980385 | 0.994766 | 0.981031 | 0.973258 | 0.975376 |
| 12 | 0.993035 | 0.976814 | 0.983941 | 0.983013 | 0.975446 | 0.977194 |
| 13 | 0.997657 | 0.975718 | 0.984431 | 0.979698 | 0.972953 | 0.974458 |
| 14 | 0.992435 | 0.975635 | 0.988525 | 0.980597 | 0.974145 | 0.975404 |
| 15 | 0.992044 | 0.994592 | 0.98136 | 0.980598 | 0.972621 | 0.974072 |
| 16 | 0.987982 | 0.98953 | 0.982454 | 0.978974 | 0.969713 | 0.973399 |
| 17 | 0.988976 | 0.974648 | 0.989258 | 0.975896 | 0.968205 | 0.970774 |
| 18 | 0.989549 | 0.985904 | 0.991219 | 0.97689 | 0.96801 | 0.970995 |
| 19 | 0.989642 | 0.971065 | 0.977632 | 0.970781 | 0.964062 | 0.967166 |
| 20 | 0.982901 | 0.976244 | 0.977993 | 0.97456 | 0.964437 | 0.968066 |
| 21 | 0.997666 | 0.968023 | 0.977568 | 0.97036 | 0.961282 | 0.963232 |
| 22 | 0.987 | 0.974182 | 0.978362 | 0.970811 | 0.961305 | 0.96382 |
| 23 | 0.991862 | 0.97917 | 0.978552 | 0.972653 | 0.965796 | 0.967208 |
| 24 | 0.983979 | 0.980122 | 0.983923 | 0.976105 | 0.963374 | 0.965849 |
| 25 | 0.993145 | 0.981817 | 0.97346 | 0.970784 | 0.958887 | 0.962608 |
| 26 | 0.965208 | 0.989626 | 0.996841 | 0.98765 | 0.979172 | 0.97935 |
| 27 | 0.972358 | 0.991938 | 0.990567 | 0.987037 | 0.974396 | 0.975606 |
| 28 | 0.974458 | 0.994478 | 0.987327 | 0.983585 | 0.972744 | 0.973852 |
| 29 | 0.981126 | 0.988354 | 0.98263 | 0.981304 | 0.971462 | 0.972778 |
| 30 | 0.969006 | 0.99099 | 0.98533 | 0.979876 | 0.967637 | 0.970586 |
| 31 | 0.977043 | 0.983157 | 0.984773 | 0.978897 | 0.968771 | 0.971359 |
| 32 | 0.970748 | 0.98538 | 0.989124 | 0.975886 | 0.965486 | 0.968226 |
| 33 | 0.980102 | 0.987075 | 0.988186 | 0.980435 | 0.969832 | 0.972326 |

| | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 34 | 0.976168 | 0.987966 | 0.987562 | 0.980319 | 0.969906 | 0.972329 |
| 35 | 0.977947 | 0.987757 | 0.990788 | 0.97825 | 0.967598 | 0.970439 |
| 36 | 0.982615 | 0.973899 | 0.977914 | 0.975626 | 0.968073 | 0.969558 |
| 37 | 0.972767 | 0.977364 | 0.98004 | 0.972243 | 0.963129 | 0.965822 |
| 38 | 0.975817 | 0.991183 | 0.993751 | 0.975983 | 0.966908 | 0.968853 |
| 39 | 0.987876 | 0.971951 | 0.983859 | 0.969464 | 0.962904 | 0.963927 |
| 40 | 0.97 | 0.990513 | 0.991058 | 0.975155 | 0.968658 | 0.970821 |
| 41 | 0.974432 | 0.995046 | 0.988399 | 0.970024 | 0.961838 | 0.964191 |
| 42 | 0.974433 | 0.987808 | 0.987354 | 0.970929 | 0.964046 | 0.965599 |
| 43 | 0.974039 | 0.992785 | 0.987692 | 0.976074 | 0.967662 | 0.968956 |
| 44 | 0.966923 | 0.993451 | 0.991362 | 0.976085 | 0.969376 | 0.970863 |
| 45 | 0.980649 | 0.996869 | 0.989223 | 0.971749 | 0.966126 | 0.966113 |
| 46 | 0.977874 | 0.994184 | 0.988283 | 0.971976 | 0.964824 | 0.965132 |
| 47 | 0.979505 | 0.990209 | 0.99184 | 0.974134 | 0.966087 | 0.966483 |
| 48 | 0.966771 | 0.998852 | 0.991209 | 0.973099 | 0.96879 | 0.970284 |
| 49 | 0.979636 | 0.98531 | 0.980764 | 0.970393 | 0.964142 | 0.964927 |
| 50 | 0.983446 | 0.985924 | 0.980801 | 0.968209 | 0.960793 | 0.962614 |

| 시료 | OES-20 | OES-27 | OES-28 | OES-31 | OES-34 | OES-37 |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0.997991 | 0.998798 | 1 |
| 2 | 0.999883 | 0.99403 | 0.989419 | 1 | 0.999537 | 0.999573 |
| 3 | 0.9984 | 0.989658 | 0.982953 | 0.999178 | 0.997968 | 0.998615 |
| 4 | 0.998437 | 0.988356 | 0.981592 | 0.99975 | 0.997924 | 0.998875 |
| 5 | 0.996954 | 0.987163 | 0.97993 | 0.99828 | 0.997109 | 0.997833 |
| 6 | 0.998344 | 0.988551 | 0.981673 | 0.99898 | 0.999977 | 0.999057 |
| 7 | 0.998155 | 0.988628 | 0.978668 | 0.996761 | 1 | 0.997744 |
| 8 | 0.997257 | 0.98541 | 0.980251 | 0.997229 | 0.996246 | 0.996349 |
| 9 | 0.997527 | 0.986 | 0.979086 | 0.997374 | 0.997764 | 0.99681 |
| 10 | 0.994001 | 0.982724 | 0.974577 | 0.99558 | 0.994738 | 0.995116 |
| 11 | 0.994116 | 0.984163 | 0.978435 | 0.994603 | 0.995951 | 0.996074 |
| 12 | 0.995952 | 0.985159 | 0.979647 | 0.995409 | 0.997287 | 0.996491 |
| 13 | 0.993725 | 0.983247 | 0.981378 | 0.994882 | 0.995865 | 0.996858 |
| 14 | 0.994637 | 0.983826 | 0.979678 | 0.994793 | 0.996066 | 0.996431 |
| 15 | 0.993024 | 0.982316 | 0.975859 | 0.993395 | 0.994855 | 0.994774 |
| 16 | 0.991169 | 0.980189 | 0.971804 | 0.991514 | 0.992862 | 0.993255 |
| 17 | 0.99059 | 0.97991 | 0.974233 | 0.990248 | 0.991745 | 0.993477 |
| 18 | 0.990231 | 0.979132 | 0.971664 | 0.989902 | 0.990916 | 0.992317 |
| 19 | 0.988597 | 0.977433 | 0.972707 | 0.98841 | 0.989792 | 0.9922 |
| 20 | 0.988339 | 0.97668 | 0.967052 | 0.986611 | 0.989347 | 0.990348 |
| 21 | 0.988376 | 0.975636 | 0.973229 | 0.986154 | 0.987912 | 0.990947 |
| 22 | 0.987059 | 0.974362 | 0.968718 | 0.985093 | 0.987261 | 0.990078 |
| 23 | 0.989969 | 0.977437 | 0.974213 | 0.988903 | 0.989594 | 0.990918 |
| 24 | 0.987473 | 0.976046 | 0.967894 | 0.985269 | 0.988216 | 0.989595 |
| 25 | 0.985897 | 0.973084 | 0.969242 | 0.983676 | 0.985539 | 0.990026 |
| 26 | 0.989886 | 0.988027 | 0.984718 | 0.982945 | 0.989405 | 0.989412 |
| 27 | 0.989655 | 0.982696 | 0.976092 | 0.985544 | 0.989183 | 0.990487 |

| | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 28 | 0.989777 | 0.981228 | 0.974782 | 0.986479 | 0.990272 | 0.991602 |
| 29 | 0.989929 | 0.979928 | 0.975251 | 0.98867 | 0.990798 | 0.992275 |
| 30 | 0.987897 | 0.978618 | 0.967973 | 0.987208 | 0.990563 | 0.991138 |
| 31 | 0.989444 | 0.979965 | 0.970342 | 0.98899 | 0.990639 | 0.992612 |
| 32 | 0.987931 | 0.97872 | 0.968154 | 0.987275 | 0.991146 | 0.991649 |
| 33 | 0.989796 | 0.979207 | 0.969883 | 0.98963 | 0.991328 | 0.991972 |
| 34 | 0.989058 | 0.979466 | 0.969675 | 0.989846 | 0.991033 | 0.991847 |
| 35 | 0.98877 | 0.979247 | 0.971224 | 0.988905 | 0.991823 | 0.992468 |
| 36 | 0.988776 | 0.978745 | 0.974612 | 0.98947 | 0.990272 | 0.992891 |
| 37 | 0.987022 | 0.977763 | 0.97037 | 0.987245 | 0.990675 | 0.991918 |
| 38 | 0.988279 | 0.978103 | 0.96978 | 0.988509 | 0.990676 | 0.991513 |
| 39 | 0.988477 | 0.977705 | 0.975953 | 0.987961 | 0.989317 | 0.992495 |
| 40 | 0.98927 | 0.979758 | 0.970522 | 0.988784 | 0.991104 | 0.991759 |
| 41 | 0.986342 | 0.977003 | 0.969883 | 0.987005 | 0.989847 | 0.991512 |
| 42 | 0.986795 | 0.977113 | 0.971096 | 0.987108 | 0.990269 | 0.991701 |
| 43 | 0.987864 | 0.978568 | 0.970332 | 0.988052 | 0.990083 | 0.991745 |
| 44 | 0.988326 | 0.978578 | 0.970005 | 0.988533 | 0.9908 | 0.991787 |
| 45 | 0.988571 | 0.979267 | 0.976135 | 0.988196 | 0.990861 | 0.993103 |
| 46 | 0.986797 | 0.977448 | 0.973565 | 0.986833 | 0.989248 | 0.992629 |
| 47 | 0.987055 | 0.977222 | 0.972893 | 0.98744 | 0.989334 | 0.992545 |
| 48 | 0.987825 | 0.978541 | 0.972259 | 0.988167 | 0.989824 | 0.992476 |
| 49 | 0.986963 | 0.977878 | 0.976156 | 0.986453 | 0.989316 | 0.992761 |
| 50 | 0.984576 | 0.974721 | 0.974412 | 0.985154 | 0.986649 | 0.9932 |

| 시료 | OES-47 | OES-50 | OES-53 | b-factor | Etch Rate |
|----|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1 | 0.998586 | 0.99764 | 1 | 0.99179 | 389.1578 |
| 2 | 0.99782 | 0.99773 | 0.988542 | 0.992619 | 392.3937 |
| 3 | 0.996343 | 0.993661 | 0.979906 | 0.994172 | 411.8109 |
| 4 | 0.996624 | 0.995218 | 0.980556 | 0.994582 | 410.1937 |
| 5 | 0.996104 | 0.99507 | 0.978484 | 0.994643 | 409.3843 |
| 6 | 0.997285 | 0.995011 | 0.986499 | 0.994206 | 402.2024 |
| 7 | 0.996169 | 0.995931 | 0.979625 | 0.994278 | 401.2937 |
| 8 | 0.99532 | 0.996136 | 0.979788 | 0.995879 | 415.8562 |
| 9 | 0.995966 | 0.996522 | 0.982092 | 0.996385 | 416.6656 |
| 10 | 0.994975 | 0.995064 | 0.975568 | 0.995264 | 407.7655 |
| 11 | 0.996425 | 0.995941 | 0.981959 | 0.995714 | 407.7655 |
| 12 | 0.996879 | 0.996882 | 0.983618 | 0.995927 | 409.3843 |
| 13 | 0.998181 | 0.997906 | 0.991348 | 0.996962 | 413.4296 |
| 14 | 0.99723 | 0.997255 | 0.985525 | 0.997901 | 423.1391 |
| 15 | 0.995737 | 0.995548 | 0.978217 | 0.995995 | 408.5749 |
| 16 | 0.994228 | 0.99541 | 0.971854 | 0.996233 | 411.0031 |
| 17 | 0.995195 | 0.996249 | 0.974767 | 0.996616 | 411.0031 |
| 18 | 0.994088 | 0.995388 | 0.972082 | 0.996264 | 408.5749 |
| 19 | 0.994413 | 0.99744 | 0.976932 | 0.997791 | 414.239 |
| 20 | 0.992184 | 0.995341 | 0.966857 | 0.997236 | 412.6203 |
| 21 | 0.994544 | 0.997222 | 0.98324 | 0.998388 | 415.8562 |

| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 22 | 0.992951 | 0.997148 | 0.975195 | 0.998213 | 413.4296 |
| 23 | 0.993574 | 0.997946 | 0.980791 | 0.998021 | 414.239 |
| 24 | 0.992336 | 0.99649 | 0.972938 | 0.997439 | 409.3843 |
| 25 | 0.993052 | 0.996244 | 0.977771 | 0.997892 | 412.6203 |
| 26 | 0.993189 | 0.997932 | 0.988897 | 0.995892 | 400.4843 |
| 27 | 0.993352 | 0.996973 | 0.97779 | 0.996243 | 404.5296 |
| 28 | 0.994051 | 0.997132 | 0.977457 | 0.995453 | 397.2484 |
| 29 | 0.995177 | 0.996801 | 0.980202 | 0.996619 | 406.9578 |
| 30 | 0.993914 | 0.996533 | 0.971376 | 0.997654 | 412.6203 |
| 31 | 0.994419 | 0.995128 | 0.974835 | 0.995647 | 400.4843 |
| 32 | 0.995182 | 0.997387 | 0.975989 | 0.997904 | 411.0031 |
| 33 | 0.994888 | 0.994855 | 0.972028 | 0.997792 | 420.7109 |
| 34 | 0.994955 | 0.996152 | 0.973819 | 0.9975 | 415.0484 |
| 35 | 0.996292 | 0.99674 | 0.978943 | 0.997388 | 411.0031 |
| 36 | 0.99688 | 0.997438 | 0.983251 | 0.996997 | 406.9578 |
| 37 | 0.996538 | 0.998817 | 0.981645 | 0.998855 | 414.239 |
| 38 | 0.995469 | 0.996977 | 0.97764 | 0.99756 | 410.1937 |
| 39 | 0.998195 | 0.999371 | 0.993495 | 0.99803 | 406.9578 |
| 40 | 0.994987 | 0.997767 | 0.975918 | 0.998874 | 421.5203 |
| 41 | 0.996693 | 0.998948 | 0.983588 | 0.998817 | 411.8109 |
| 42 | 0.997074 | 0.998974 | 0.98427 | 0.998939 | 414.239 |
| 43 | 0.996098 | 0.997125 | 0.979984 | 0.997864 | 411.8109 |
| 44 | 0.995521 | 0.998435 | 0.976648 | 0.998425 | 415.8562 |
| 45 | 0.999263 | 0.99984 | 0.995658 | 0.997985 | 405.339 |
| 46 | 0.99886 | 0.999439 | 0.991554 | 0.999035 | 413.4296 |
| 47 | 0.998493 | 0.998441 | 0.989714 | 0.998612 | 413.4296 |
| 48 | 0.99706 | 0.999265 | 0.981527 | 0.998481 | 414.239 |
| 49 | 1 | 1 | 0.99664 | 0.999281 | 414.239 |
| 50 | 0.999759 | 0.999225 | 0.994903 | 1 | 421.5203 |

표 B.1. 시각 공정 실험 결과 - 모니터링 인자와 시각률

Abstract

Development of Operating Power Dependent Etch Process Control in Triple Frequency Driven Capacitively Coupled Plasma Source

Sangmin Jeong

Department of Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

For several decades, the semiconductor manufacturing technology that represented by Moore's Law has been developed to maximize productivity while reducing the line width of device every year. Recently, however, there are limits to the reduction of the line width by various technical problems. So, development of high efficiency and performance process equipment and process control technology is important to reduce costs and improve productivity of semiconductor manufacturing.

The plasma etching processes are very important parts of semiconductor manufacturing process. Among them, dual frequency capacitively coupled plasma(DF-CCP) using very high frequency(VHF, above 40MHz) for high density plasma and low frequency(LF, up to several MHz) for high incident ion energy has been widely used for dielectric material etch process. Recently, additional bias power in the frequency range between

VHF and LF, which is so-called high frequency(HF) bias against the LF bias, has been chosen. It was named as a triple frequency(TF) CCP and has achieved the high performance in etch rate, selectivity and uniformity of the process.

Many efforts have been made to improve productivity and reduce production costs by process control using process monitoring techniques. However, the plasma property has not been included in the monitoring techniques by statistical methods so far and there are limitations of the accuracy and physical interpretation. In this study, the development of process monitoring and process control techniques through the plasma characterization analysis of plasma etching apparatus was clarified by the physical interpretation for decision process monitoring factors and process control factors with high accuracy.

The effects of each operating powers on the plasma property were investigated in a triple frequency (TF) narrow gap CCP etcher equipped with 100MHz on the top electrode and 13.56/2MHz on the bottom electrode. Particularly the nonlinear characteristics of the etching process result by 13.56MHz were found and analyzed using the circuit model of the plasma device. The most appropriate process fine control factor was found to be 13.56MHz which is effective on the control of the plasma density compared to 20 MHz and free from the standing wave effect of 100MHz. Thus, the interpretation of the nonlinear plasma property is essential for the plasma process monitoring and control.

Through analysis of the plasma property, the process window

was defined. In this region, using the shape factor of EEDF and high sensitive OES sensor with operating powers, the etch rate virtual metrology model was derived and showed the high accuracy for the etch results. Also, it was confirmed that the fine control of etch process can be done by 13.56MHz through analysis of the correlation between the etch process result and each operating powers.

Therefore, this study has a great significance to make concepts for smart equipment that can manage and control the process by itself.

keywords : Plasma Etch Process, Capacitively Coupled Plasma,
Process Monitoring, Virtual Metrology, Process
Control

Student Number : 2012-23286